

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior



Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos

Área de Ingeniería térmica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Instrumentación, adquisición de datos y ensayo
de bombas de agua manuales de pistón: Afridev.**

Autor: SERGIO FERRER SAAVEDRA

Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO

Ingeniería Técnica Industrial de mecánica.

Madrid 28 de Marzo de 2012

Índice:

1. Introducción	4
2. Abastecimiento de agua	6
3. Bombeo manual	11
3.1 Aguas subterráneas	11
3.2 Necesidad de consumo de agua	15
3.3 Concepto VLOM	18
3.4 Tecnologías para la captación de aguas subterráneas	20
3.4.1 Acceso al agua. Pozos	20
3.4.1.1 Pozos y bombeo manual	21
3.4.2 Tecnología de bombeo	24
3.4.3 Conclusiones	25
3.5 Esfuerzo Aplicado al Bombeo Manual	27
4. Instalación	30
4.1 Bomba manual Afridev	30
4.1.1 Introducción	30
4.1.2 Características de nuestra instalación	32
4.1.3 Mantenimiento a pie de campo	37
4.1.3.1 Desmontaje	38
4.1.3.2 Montaje	43
4.2 Instalación del laboratorio	48
4.2.1 Características	48
4.2.2 Simulación	50
4.2.2.1 Regulación del Sensor de presión	56
4.2.2.2 Estanqueidad del sistema de presión	59

4.3 Mantenimiento de la instalación del laboratorio	63
4.3.1 Desmontaje	63
4.3.2 Montaje	70
5. Resultados	75
5.1 Sistema de presión	75
5.1.1 Caracterización del sistema de presión	75
5.1.2 Perdidas del sistema de presión	82
5.1.3 Perdidas de la válvula de pie fija	85
5.3 Fuerza de bombeo	86
5.3.1 Caracterización del brazo	86
5.3.2 Fuerzas de bombeo	99
6. Estudio final	105
6.1 Fuerzas de bombeo	105
6.2 Caudal de bombeo	110
7. Conclusiones	112
8. Bibliografía	113

1.Introducción

En el proyecto que sigue, comenzaremos adentrándonos en el mundo del bombeo manual, sus inicios, principales fines y características más singulares, para más adelante centrarnos en el estudio de la bomba manual de pistón Afridev, más concretamente en el conocimiento de la instalación, sus partes, sus aspectos técnicos, su mantenimiento y su propio comportamiento en la acción de bombeo, analizando cualquier aspecto que nos influya en su correcto funcionamiento.

Este estudio se basa en la instalación del laboratorio, que apenas tiene unos 3,5 metros de profundidad, en la cual tendremos que realizar un correcto sistema de simulación, que nos permita acercarnos a una instalación a pie de campo. Esta simulación consiste en poder bombear agua en un rango de altura de 4 a 40 metros de profundidad del pozo, con lo que podremos estudiar el comportamiento de la bomba en situaciones críticas de bombeo.

La simulación consiste en, mediante la instalación de laboratorio situarnos en rangos de altura muchos mayores a la real. Ya que en la altura del pozo solo influyen dos aspectos, la columna de agua en una altura dada, y la fuerza generada por el peso del eje de bombeo, la simulación constara de dos partes:

- **Presión:** mediante un sistema de presión podremos presurizar el fluido de bombeo (agua), que simule una altura elegida de la columna de agua, que se encuentra en la tubería de bombeo. El peso de esta columna de agua reposa sobre un pistón móvil, que está unido al brazo, por lo que mediante la hidrostática podemos saber cuál es la presión total en el extremo final de la tubería, que será la presión que simule la profundidad de bombeo del pozo.
- **Peso del eje:** el brazo tiene el peso del eje de bombeo aplicado en su extremo anclado, por el que aumentara según aumente la profundidad del pozo, o en nuestro caso, la longitud del eje. Para la simulación del peso del eje de bombeo se utilizara un sistema de cuerdas y poleas en el que se aplique un esfuerzo correspondiente a la citada longitud del eje en un punto del brazo de la bomba, el cual será elegido en función de la mejora del estudio.

Con el correcto funcionamiento del sistema de simulación, podremos centrarnos en el aspecto crítico de cualquier bomba manual, que es la fuerza necesaria para la extracción de agua, la cual corre a cargo del usuario de la misma.

La fuerza de bombeo se divide en fuerza de bajada y fuerza de subida del brazo, una gran parte del proyecto consistirá en caracterizar el propio esfuerzo de bombeo, para lo cual tendremos que encontrarnos en diferentes puntos de funcionamiento.

Mediante una serie de ensayos llegaremos a unos datos finales, de los que podremos sacar unas conclusiones que esperemos que se asemejen a los valores correctos.

2. Abastecimiento de agua

Todo el mundo sabe que el agua es vida, sin ella, la existencia del ser humano en el planeta tierra finalizaría. Pero aunque estamos cansados de oírlo, verdaderamente nos hemos parado a pensar ¿Cuánto tiempo podremos vivir teniendo en cuenta la problemática del agua?

Pues bien, en los últimos treinta años, a raíz del trabajo de estudio de múltiples organismos internacionales se ha venido denunciando la alarmante situación de grandes masas de población en el ámbito del abastecimiento de agua potable en los países más explotados del planeta. Naciones Unidas a través de numerosos informes ha planteado que en el año 2000, había más de 2.100 millones de personas utilizando una cantidad de agua inferior a la considerada como imprescindible para evitar afecciones en la salud relacionadas con la escasez, y que en 2050, se calcula que habrá cerca de 4.200 millones de personas (más del 45% del total mundial) que estarán viviendo en países donde la población estará por debajo de este consumo básico de agua.

Esta problemática se ve agravada en muchas situaciones por el empleo de aguas provenientes de fuentes no saneadas. Según la organización mundial de la salud (OMS), entre 2.400 y 3.000 millones de personas utilizan diariamente estas fuentes. Esas limitaciones son más alarmantes en las zonas rurales, donde un 62% de los residentes carecen de acceso a fuentes saneadas (CSD 1997b). En los años 90, el número de niños muertos por diarrea causada por la falta de agua saneada superó a las víctimas de conflictos armados registradas desde la Segunda Guerra Mundial (Ahrtag 1995).

Pero el problema no deja de crecer, el rápido crecimiento de la población mundial está convirtiendo el agua en un bien cada vez máspreciado y escaso. De hecho, tan sólo tres países consumen el 38% de los recursos hídricos disponibles en el planeta. China, India y EEUU encabezan el ranking mundial que calcula la huella hídrica de cada nación, una medida que estima el volumen total de agua consumida por el hombre para producir bienes y servicios.

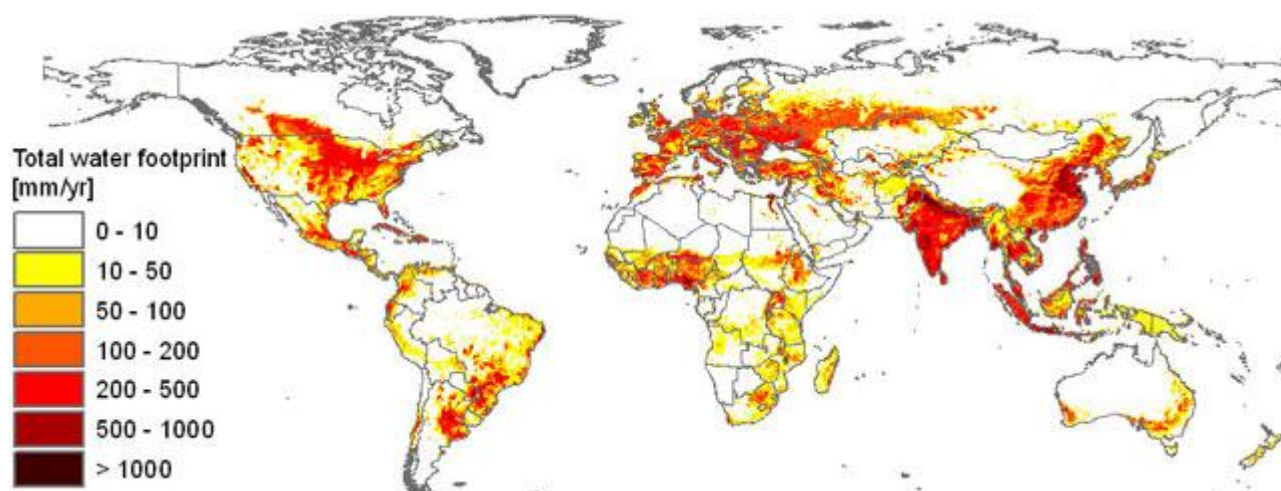


Figura 1: Huella hídrica por países durante 1999-2005.

Pero aquí no acaba el problema, aunque la mayor parte de la Tierra está cubierta por el agua, casi toda ella es parte de los océanos salados. Solamente una pequeña porción del agua de la Tierra es agua dulce, incluyendo ríos, lagos y las aguas subterráneas. El ser humano necesita el agua dulce para numerosas actividades (beber, preparar las comidas, lavar, regar cultivos).

Hecho	Lugar	Característica
Mayor océano	Océano Pacífico	superficie = 166 millones de km ²
Mayor mar	Mar Meridional de China	superficie = 3 millones de km ²
Mayor bahía	Bahía de Bengala	superficie = 2.2 millones de km ²
Mayor profundidad en los océanos	Fosa de Las Marianas (Océano Pacífico)	profundidad = 11 km
Mar más salado	Mar Muerto (Israel/Jordania)	9 veces más salado que el agua del océano
Agua del mar más caliente	Golfo Pérsico	35° C (95° F)
Río más largo	Río Nilo (África)	6,671 km
Mayor Bahía	Bahía de Bengala	superficie = 2.2 millones de km ²
Río que lleva más agua	Río Amazonas (América del Sur)	vierte 4 millones de pies cúbicos cada segundo en el Océano Atlántico
Río con más sedimentos	Río Amarillo (China)	deposita cieno en más de 141,645 km ² en su llanura de sedimentación y delta, arrastrando más de 2 mil millones de toneladas de suelo
Salto de agua más alto	El Ángel (Venezuela)	caída total = 979 metros
Lago más profundo y el más viejo	Baikal (Siberia)	parte más profunda = 1940 m edad = 25 millones de años
Mayor lago de agua dulce	Lago Superior (América del Norte)	superficie = 82,103 km ²
Mayor lago salado	Mar Caspio	superficie = 371,841 km ²
Lago de agua dulce más largo	Lago Tangañica (África)	longitud = 676 km
Lago navegable más alto	Lago Titicaca (América del Sur)	altitud = 3,811 m

Tabla 1: Datos sobre cuerpos de agua.

De estos datos característicos hemos decir que muy poca agua es utilizada para el consumo del hombre, ya que: el 90 % es agua de mar y tiene sal, el 2 % es hielo y está en los polos, y sólo el 1 % de toda el agua del planeta es dulce, encontrándose en ríos, lagos y mantos subterráneos. Además las fuentes, los manantiales, las cuencas o cañadas están en acelerada vía de extinción, debido a los cambios de clima y de suelo, inundaciones, sequías y desertización, pero es la acción humana la más drástica: ejerce una deforestación delirante, ignora los conocimientos tradicionales sobre todo de las comunidades indígenas locales, retira el agua de los ríos de diferentes maneras, entre otras con obras de ingeniería, represas y desvíos.

Además, de ese 1% del agua del planeta que puede ser utilizado por el hombre, el sector agrícola es el mayor consumidor de agua con el 65%, no sólo porque la superficie irrigada en el mundo ha tenido que quintuplicarse sino porque no se cuenta con un sistema de riego eficiente, razón principal que provoca que las pérdidas se tornen monumentales. Le siguen el sector industrial que requiere del 25% y el consumo doméstico, comercial y de otros servicios urbanos municipales que requieren el 10%. Esto significa que el porcentaje final de agua destinada para la supervivencia del ser humano es mínimo, con lo que necesitamos un control exhaustivo en el consumo de este bien tan preciado.

En la siguiente tabla podemos observar el consumo de agua en distintos países.

USOS DEL AGUA		
ESTADOS UNIDOS Uso per cápita (m3/año): 1.868 Abastecimiento (%): 13 Industria (%): 45 Regadío (%): 42 Usos/recursos (%): 19	BULGARIA Uso per cápita (m3/año): 1.545 Abastecimiento (%): 3 Industria (%): 76 Regadío (%): 22 Usos/recursos (%): 7	JAPÓN Uso per cápita (m3/año): 732 Abastecimiento (%): 17 Industria (%): 33 Regadío (%): 50 Usos/recursos (%): 16
ESPAÑA Uso per cápita (m3/año): 1.188 Abastecimiento (%): 12 Industria (%): 26 Regadío (%): 62 Usos/recursos (%): 41	EGIPTO Uso per cápita (m3/año): 1.028 Abastecimiento (%): 7 Industria (%): 5 Regadío (%): 88 Usos/recursos (%): 97	MADAGASCAR Uso per cápita (m3/año): 1.642 Abastecimiento (%): 1 Industria (%): 0 Regadío (%): 99 Usos/recursos (%): 41

Tabla 2: Datos consumo de agua en países de distinto continente.

El control de abastecimiento del agua, no debería imponerse como una orden, sino que el ser humano debe ser capaz de gestionarse su propio consumo, así como un control personal de la utilización de ella. Pero por el contrario la competencia por el suministro de agua dulce produce problemas sociales, económicos y políticos.

Las cuencas fluviales y otras masas de agua no respetan las fronteras nacionales. Así, por ejemplo, la utilización del agua por un país situado aguas arriba suele ignorar el suministro disponible para los países situados aguas abajo. En los albores del siglo XXI se vislumbra el peligro creciente de conflictos armados por el acceso a suministros de agua dulce.

Es preocupante observar los costos del agua en diferentes partes del mundo, en Malasia un metro cúbico de agua cuesta \$20 USD, en cambio en los EE.UU. el costo es de \$0.10-0.15 USD lo cual indica que un país pobre paga hasta 200 veces más que un país rico. El agua embotellada ha alcanzado valores por litro mayores a los de la leche y la gasolina; por lo que puede considerarse que la creciente escasez del agua traerá catástrofes de nivel internacional como son: guerras, hambrunas, miseria y migración.

Debido a que los suministros de agua dulce son el elemento esencial que permite la supervivencia y el desarrollo, también han sido, a veces, motivo de conflictos y disputas, pero a la vez, son una fuente de cooperación entre personas que comparten los recursos del agua. A la par del aumento de la demanda del líquido vital, las negociaciones sobre la asignación y administración de los recursos del agua son cada vez más comunes y necesarias.

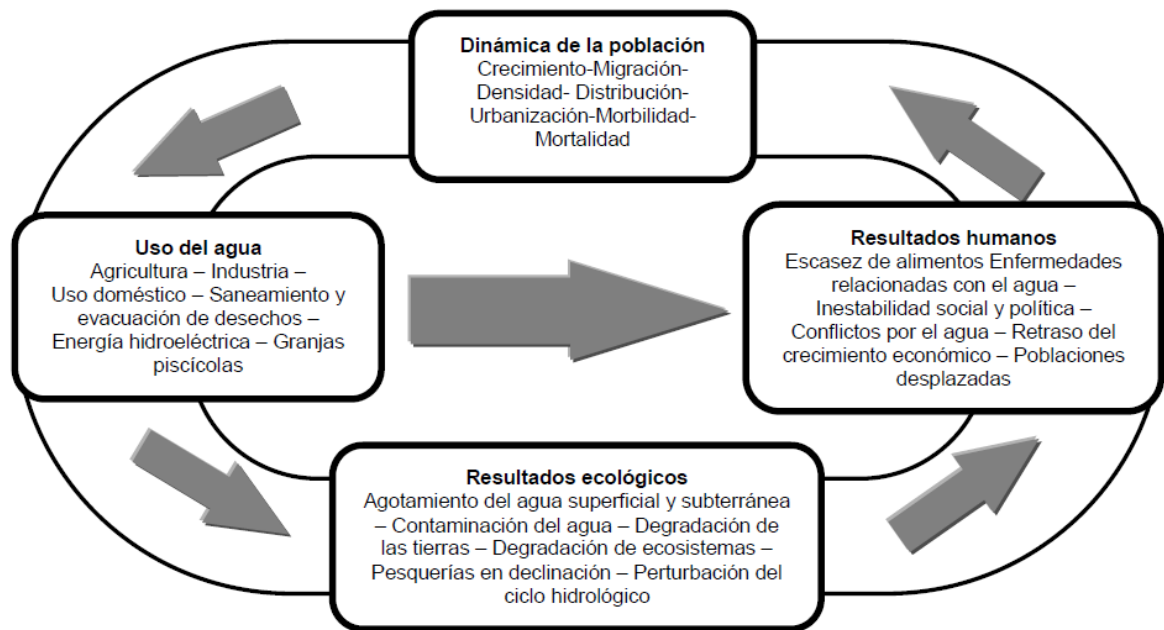


Figura 2: Vínculos entre la población y el agua dulce.

Pero el ser humano siempre ha buscado soluciones para su abastecimiento. Por ejemplo, los Sistemas de Captación del Agua de Lluvia se remontan a épocas históricas, en la región de la Mesopotamia se tienen registros con más de 5000 años. A principios de este siglo éstos Sistemas para uso doméstico perdieron su importancia debido al rápido crecimiento de las ciudades y a los sistemas de distribución del agua a nivel domiciliario.

En algunas regiones de los países de América Latina y el Caribe desde hace más de tres siglos se han utilizado Sistemas de Captación del Agua de Lluvia donde la recolección de agua proveniente de los techos es almacenada en cisternas de diferentes tipos y materiales, que aún representan la fuente principal de agua para uso doméstico.

En la época colonial era común el diseño de diversos Sistemas de Captación del Agua de Lluvia en las haciendas, en los conventos y en las casas-habitación; se observan vestigios de estas tecnologías en los conventos de Santo Domingo (Oaxaca, Méx.), Acolman, (Edo. de Méx.) y Zacatecas (Zacatecas, Méx.).

En el Estado de Campeche, México, la utilización del agua de lluvia es común para consumo humano, ya que el agua potable de las ciudades contiene altas concentraciones de sales y causa cálculos renales. En contraste, en varios países, aún se observa el sistema de carretas-tanque y tanques cisternas que reparten agua potable a diversos núcleos de población, lo cual representa una considerable contribución económica por parte de los usuarios, a pesar de que en ocasiones es subsidiado por instituciones gubernamentales.

Pero no todos tienen las mismas posibilidades de abastecimiento. En el norte del territorio nacional, el agua de lluvia que se capta por escurrimiento es únicamente el 4% mientras que en el sureste y las zonas costeras se logra captar el 50% del escurrimiento.

Deberíamos ayudarnos mutuamente para que los más desfavorecidos tengan las mismas posibilidades para un correcto abastecimiento del agua que en países desarrollados. De ahí surgen numerosos programas para resolver esta problemática.

En estos programas de intervención ha destacado la opción del bombeo manual como tecnología para enfrentar esta situación. A raíz de este uso ha proliferado el diseño de bombas manuales, adquiriendo un papel importante para el abastecimiento de agua en numerosos países y desarrollándose modelos específicos para cada zona en cuestión. Según la SKAT organismo responsable del monitoreo de los programas en este ámbito del Banco Mundial, actualmente más de 1000 millones de personas basan su abastecimiento en el empleo de bombas manuales.

Para un correcto abastecimiento se instala una bomba manual debidamente protegida, con la cual se intentara abastecer a un cierto número de habitantes. Esta opción del bombeo manual sólo es factible en zonas con acuíferos aptos para su explotación. Se consigue un buen acceso al agua de entre 10 y 40 metros de profundidad. Los costes iniciales y de operación y mantenimiento son bajos y las tareas de mantenimiento son asumibles por la comunidad. Lo único imprescindible es la necesidad del esfuerzo humano para operar. La tasa de éxito de estos proyectos depende en gran medida de la aplicación del concepto y tecnologías.

3. Bombeo manual

Al afrontar un proyecto real de tecnologías apropiadas se deben tener en cuenta los dos principios fundamentales que debe seguir todo proyecto de abastecimiento (Arlosoloff, 1987):

- El servicio que se dé a la comunidad de la tecnología escogida debe de estar dentro de dos parámetros, lo que ésta esté dispuesta a pagar por dicha tecnología y la capacidad para mantenerla en servicio.
- El nivel de servicio debe de ser sostenible y no sobreexplotar los acuíferos ni el ecosistema.

Para el abastecimiento de agua debe de existir un equilibrio entre la tecnología disponible, los recursos hídricos existentes y las capacidades organizativas y financieras de una comunidad. A continuación se detalla los distintos apartados en el estudio del abastecimiento de agua y la importancia del bombeo manual:

- Aguas subterráneas: Recurso hídrico preferido en los proyectos de cooperación por sus propiedades.
- Necesidades básicas de consumo de agua.
- Concepto VLOM.
- Tecnologías para la captación de aguas subterráneas.
- Esfuerzo aplicado a la bomba manual.

3.1 Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas presentan una serie de ventajas frente a otras fuentes existentes para el suministro de agua (aguas superficiales, agua de lluvia), como el filtrado natural que proporciona la tierra y su escasa evaporación. Entre sus inconvenientes destacamos el desconocimiento generalizado que existe en torno a ellas y la necesidad de elevar el agua mediante tecnologías apropiadas.

En la siguiente tabla apreciamos que un tercio de la población mundial se abastece de agua para consumo, industria y regadío a través de fuentes subterráneas y extraen entre 600 y 700 km³ por año.

Region	per cent	Population served (millions)
Asia-Pacific	32	1000 – 2000
Europe	75	200 – 500
Central and South America	29	150
USA	51	135
Australia	15	3
Africa	NA	NA
World	-	1500 –2750

Tabla 3: Porcentaje del abastecimiento de agua obtenido de las aguas subterráneas (UNEP y otros 2000).

Los expertos se encuentran con grandes problemas para cuantificar las reservas existentes, la calidad de esta agua y sus mecanismos de regeneración. La dependencia de las aguas subterráneas es más acusada en las zonas rurales o con baja densidad de población por la falta de masa crítica para rusticar una estación potabilizadora de aguas superficiales (Postel 1997, Unep 1999).

Los acuíferos, grandes extensiones que contienen aguas subterráneas, se distribuyen a lo largo del planeta de forma irregular y son la fuente de abastecimiento del bombeo manual. En la siguiente figura observamos que existen acuíferos en amplias zonas del planeta, en ocasiones muy alejados de zonas húmedas o con lluvias abundantes. Debido al mal uso que en la actualidad se hace de ellos, en muchos casos quedan inutilizados por la contaminación del agua o por una sobreexplotación que hace descender drásticamente el nivel de agua, incluso hasta agotarse.

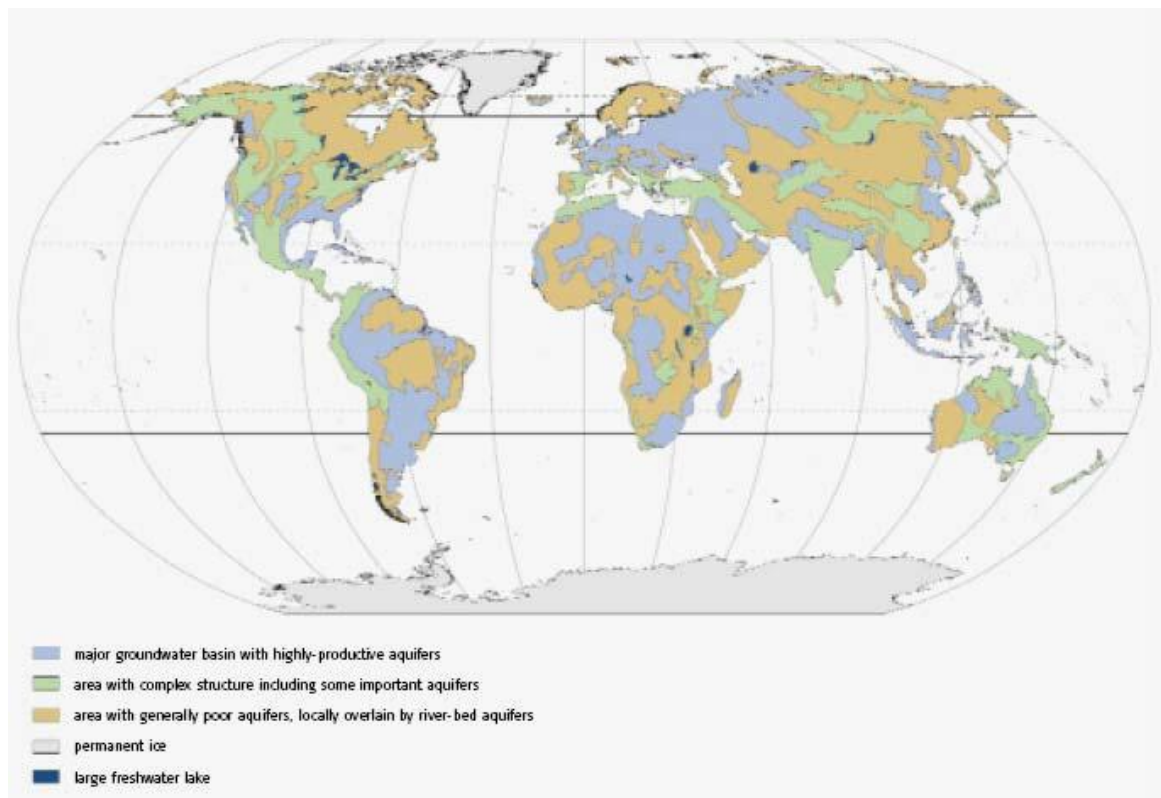


Figura 3: Recursos de aguas subterráneas en el planeta (UNEP y otros 2000).

También debemos mencionar que se ha deteriorado seriamente la calidad de los acuíferos. La salinización de las aguas subterráneas debida al exceso de bombeo se ha identificado como un problema en muchas zonas. Los procesos de abono de la agricultura pueden conducir a la contaminación de los acuíferos con nitratos, plaguicidas y bacterias. También se ha señalado como fuente de contaminación el uso de aguas residuales sin tratar para irrigación. Un número incontable de acuíferos han sido contaminados por fuentes puntuales, como sistemas sépticos, fugas en los tanques de almacenamiento subterráneo, derrames o disposición inadecuada de sustancias químicas industriales y filtraciones desde vertederos de residuos sólidos y peligrosos.

El tratamiento inadecuado de los residuos ha conducido a incidencias de cólera, amibiasis, hepatitis A y otras enfermedades. Por ello, al mismo tiempo que se profundiza en el estudio y comprensión de las aguas subterráneas, aumenta la preocupación sobre la calidad del agua potable de dichas fuentes. Los niveles elevados de nitratos en el agua potable (niveles no mayores que 10 mg/litro) pueden causar metahemoglobinemia o el síndrome del “niño azul”. El sistema digestivo de los niños convierte los nitratos en nitritos, que bloquean la capacidad de la sangre del bebe para llevar oxígeno y pueden provocar asfixia y muerte. Por ello los nitratos son un problema potencial en las aguas subterráneas.

Problemas	Causas	Temas de preocupación
Contaminación antropogénica	Protección insuficiente de los acuíferos vulnerables contra los vertidos realizados por seres humanos y aguas de lixiviación provenientes de: <ul style="list-style-type: none"> ■ actividades urbanas e industriales ■ intensificación de los cultivos agrícolas 	Patógenos, nitratos, sales de amonio, cloro, sulfatos, boro, metales pesados, COD, hidrocarburos aromáticos y halogenados nitratos, cloro, plaguicidas
Contaminación que ocurre naturalmente	Relacionada con la evolución del pH-Eh de las aguas subterráneas y la disolución de minerales (agravada por la contaminación antropogénica y/o la explotación incontrolada)	Principalmente hierro, flúor y a veces, arsénico, yodo, manganeso, aluminio, magnesio, sulfatos, selenio y nitratos (de la paleorrecarga)
Contaminación en la boca de los pozos	Diseño y construcción inadecuados de pozos que permiten la penetración directa de aguas superficiales o aguas subterráneas poco profundas contaminadas	Principalmente patógenos

Tabla 4: Problemas relativos a la calidad de las aguas subterráneas

En proyectos de cooperación al desarrollo la opción preferida a la hora de establecer un suministro de agua es el acuífero. Frente a las aguas superficiales presenta mejor calidad y no necesita tratamiento salvo en los casos descritos, y frente a las aguas de lluvia representa una fuente segura y constante de abastecimiento. De todas formas desde las distintas experiencias recogidas se aconseja monitorizar la calidad de las aguas periódicamente para evitar problemas de contaminación, que no por poco frecuentes dejen de existir.

Las bombas manuales son especialmente sensibles a una mala explotación de los acuíferos. Por si sola una bomba manual no tiene un efecto significativo sobre el acuífero ya que sus caudales de descarga son bajos. En cambio la instalación incontrolada de bombas hidráulicas eléctricas o diesel, de gran capacidad, ha provocado que los acuíferos no sean capaces de regenerarse produciéndose variaciones en el nivel de la capa freática, e inutilizando en muchos casos pozos contiguos con bombeo manual (Arlosoroff 1987), e incluso llegando a agotar los recursos de agua subterránea de una región. Un ejemplo palpable de este efecto se encuentra en Bangla Desh donde muchas bombas de succión han dejado de ser operativas en la estación seca por culpa de un descenso en el nivel del agua debido al riego intensivo.

Pero a largo plazo estos problemas se agrandaran, ya que a medida que aumenta la preocupación sobre los efectos del cambio climático, los investigadores intentan comprender sus repercusiones en los recursos hídricos. Si bien reconocen que hay lagunas considerables de información sobre las consecuencias del calentamiento global en el agua subterránea, los científicos están convencidos de que la elevación de los niveles del mar potenciará el problema de la intrusión de agua salada en los acuíferos de agua dulce. Los riesgos de esto se prevén mayores en los mantos isleños poco profundos y en los acuíferos costeros muy explotados (World Water Forum 2000).

Aparte de los usos humanos que satisface, el agua subterránea realiza muchas otras funciones ecológicas fundamentales. Es parte esencial del ciclo hidrológico en que el agua se mueve constantemente, sobre y bajo la superficie del planeta. Como tal, desempeña una función importante en el mantenimiento de corrientes, ríos, lagos, humedales y comunidades acuáticas. Las interacciones de las aguas subterráneas y superficiales son complejas y variables. La función típica de los humedales suele ser recargar los acuíferos que se sitúan bajo su manto, mientras que los que se encuentran en altitudes menores suelen recibir la mayoría de sus aguas del subsuelo. La contribución de las aguas subterráneas al caudal de ríos y arroyos varía según la geología superficial y otros factores.

Es además un factor fundamental en la viabilidad biológica de las corrientes tributarias.

Los cambios en los niveles de las aguas subterráneas pueden tener efectos significativos en hábitats críticos como la vegetación ribereña y en la vida silvestre que de ellos dependen.

3.2 Necesidades de consumo de Agua

Cada cultura tiene unos hábitos de consumo de agua diferentes y es difícil estimar a nivel mundial una cantidad mínima aceptable de abastecimiento. En los países del primer mundo el consumo de agua por habitante, a nivel doméstico, es decir, sin contar consumos industriales o de la agricultura, supera los 250 litros por persona al día. En España por ejemplo, Water Footprint, cifra en 267 el gasto doméstico. Mientras las distintas organizaciones involucradas en proyectos de desarrollo han definido la “necesidad básica de agua” en 50 litros por persona día para beber, cocinar y realizar una higiene (uso doméstico) que evite las afecciones relacionadas con la escasez. En este valor mínimo no se incluyen otros usos necesarios para el desarrollo como son la agricultura, la protección de los ecosistemas o la industria y que elevarían esta cifra a un mínimo de 100 litros por persona día (OMS y UNICEF 2000).

Los usos básicos del agua son un tema aún en discusión, la OMS en 2002 consideraba como imprescindible el agua empleada para consumo directo, preparación de alimentos y en la higiene personal. Sin embargo otros estudios realizados por el Banco Mundial o el departamento estadounidense para el desarrollo consideran el agua empleada en letrinas y cuartos de baño (saneamiento) como imprescindible. El estudio en la década del agua (1980-90) sobre el bombeo manual postulaba como tema a investigar en un futuro la viabilidad de incluir en las instalaciones de bombeo manual el riego de pequeños huertos, industrias y otras aplicaciones que sin ser imprescindibles para la vida humana permiten alcanzar un nivel de desarrollo del ser humano digno.

La calidad de un abastecimiento de agua o nivel de servicio se mide en función de los siguientes parámetros:

- Caudal de agua capaz de suministrar en un tiempo reducido.
- Capacidad de bombeo del pozo.
- Distancia entre la fuente y el consumo.
- Disponibilidad o días de funcionamiento al año.

A continuación se muestra en la los distintos niveles de abastecimiento de agua y sus consecuencias sobre la salud. Destaca en estos datos que igual de importante que proporcionar una fuente segura y abundante de agua es que la misma este situada en un punto cercano a la vivienda o usuario. Son muchos los casos documentados de proyectos que fracasan porque el punto de suministro mejorado está más alejado que la fuente tradicional y no se consigue que la población cambie sus hábitos de consumo.

Nivel del servicio	Medición del acceso	Necesidades atendidas	Nivel del efecto en la salud
Sin acceso (cantidad recolectada generalmente menor de 5 l/r/d)	Más de 1.000 m ó 30 minutos de tiempo total de recolección	Consumo – no se puede garantizar Higiene – no es posible (a no ser que se practique en la fuente)	Muy alto
Acceso básico (la cantidad promedio no puede superar 20l/r/d)	Entre 100 y 1.000 m ó de 5 a 20 minutos de tiempo total de recolección	Consumo – se debe asegurar Higiene – el lavado de manos y la higiene básica de la alimentación es posible; es difícil garantizar la lavandería y el baño a no ser que se practique en la fuente	Alto
Acceso intermedio (cantidad promedio de aproximadamente 50 l/r/d)	Agua abastecida a través de un grifo público (o dentro de 100 m ó 5 minutos del tiempo total de recolección)	Consumo – asegurado Higiene – la higiene básica personal y de los alimentos está asegurada; se debe asegurar también la lavandería y el baño	Bajo
Acceso óptimo (cantidad promedio de 100 l/r/d y más)	Agua abastecida de manera continua a través de varios grifos	Consumo – se atienden todas las necesidades Higiene – se deben atender todas las necesidades	Muy bajo

Tabla 5: Nivel de servicio de agua en relación con la accesibilidad, las necesidades atendidas y los efectos en la salud (OMS 2003).

De acuerdo a los estudios consultados se considera como imprescindible un nivel de servicio superior a 20 litros día recolectados en menos de media hora, aceptable un volumen de 50 litros en cinco minutos y aconsejable un total de 75 litros por persona día recolectados en un tiempo no superior a 5 min (Tomillo 2006). Estando el nivel óptimo en cualquier valor por encima de 100 litros. Las experiencias previas en proyectos con bombas manuales indican que los niveles de servicio obtenidos, oscilan entre los 10 y 40 litros por persona día (Arlosoloff 1987) aunque la capacidad de abastecimiento tomado en los proyectos como valor de diseño oscila entre los 50 y los 75 litros persona día. Valor suficiente para dotar a la instalación del nivel de servicio adecuado independientemente de los hábitos de consumo de la comunidad.

Normalmente el abastecimiento de agua de una familia lo realizan una o dos personas, tradicionalmente en los países en desarrollo el abastecimiento de agua es una labor de las mujeres y niños, por lo que cada persona debe bombear agua suficiente para toda la unidad familiar (6 personas de media), lo cual eleva el volumen de bombeo a 350 – 600 litros. Por lo tanto una mujer, encargada de suministrar el agua, teniendo en cuenta que una bomba manual tiene una caudales de unos 20 l/min, que la bomba está a 5 minutos de su hogar y que puede acarrear 50 litros por viaje tarda entre 87,5 y 150 minutos en abastecer a su familia de agua.

3.3 Concepto VLOM

El concepto VLOM (Village Level Operation and Maintenance) significó el desarrollo de la tecnología tradicional de bombeo a tecnología apropiada. Es decir, el concepto VLOM supuso la adaptación o el desarrollo de bombas manuales desde un enfoque técnico del primer mundo a un enfoque técnico de los países empobrecidos. Antes de 1980 casi todas las bombas manuales eran modelos derivados de los modelos existentes a principios del siglo XX y empleados mayoritariamente en los países industrializados. Sin embargo en la actualidad las bombas manuales son fruto de un intenso desarrollo que ha generado una nueva serie de bombas VLOM, “apropiadas” para su empleo en países en desarrollo.

El desarrollo del concepto VLOM fue una de las primeras consecuencias del proyecto “Rural Water Supply, Handpump Project”. La aplicación de tecnologías del primer mundo para resolver los problemas de suministro en el tercer mundo provocó que muchos de los proyectos realizados quedaran abandonados al poco de su inicio por falta de medios para sostener el sistema en funcionamiento. Tanto las tecnologías más modernas como las bombas manuales de los países desarrollados se mostraron en muchas ocasiones ineficaces como solución para la problemática existente en los países en desarrollo, que requería un enfoque específico.

En un principio el concepto VLOM estuvo orientado al desarrollo de una tecnología apropiada según los siguientes principios:

- El mantenimiento se podrá realizar con herramientas comunes, bajo nivel técnico por una persona formada al efecto denominada “village caretaker”.
- Las tecnologías escogidas se fabricarán en la medida de lo posible dentro del país de manera que se asegure la accesibilidad a piezas de repuesto.
- Se primará la disponibilidad frente a la robustez o durabilidad. Es decir, es mejor un sistema que se estropee cada 6 meses y se pueda reparar en un par de días que un sistema que se estropee cada 12 meses pero que el tiempo de reparación supone más de una semana.
- Bajo coste, tanto inicial como de operación.

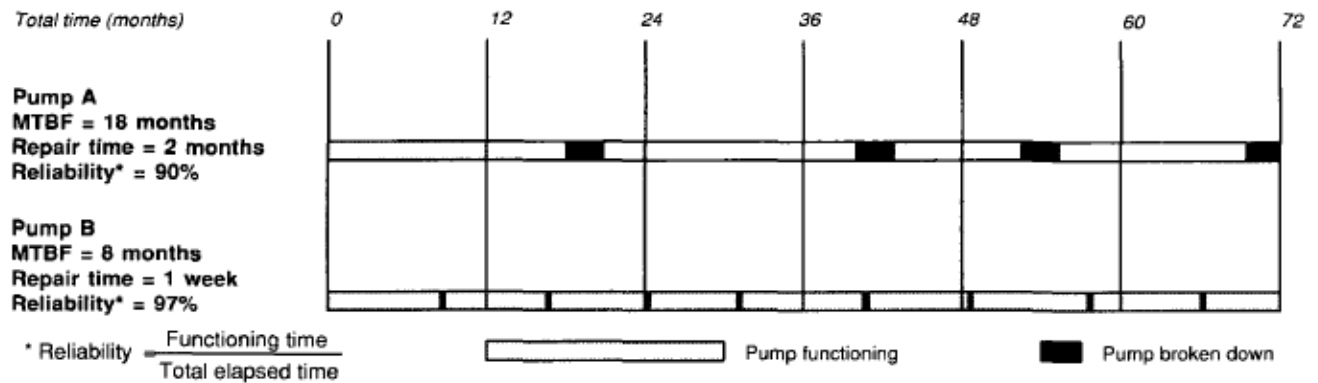


Figura 4: Disponibilidad (reliability) frente a durabilidad (Arlosoroff, 1987).

También se observó que la misma tecnología funcionaba mejor en unos países o regiones que en otras y que los proyectos que tenían éxito compartían que la comunidad beneficiaria era parte activa en el mismo. De esta forma se añadió al concepto VLOM un nuevo enfoque más amplio y no solo basado en la tecnología:

- ❖ La comunidad beneficiada será informada e involucrada desde el principio de las diversas opciones disponibles (¿Dónde? ¿Cuándo? ¿Quién?).
- ❖ Participará en la medida de sus posibilidades en la financiación del proyecto.
- ❖ Se le ofrecerán posibilidades de mayor nivel de servicio pero deberán pagar el sobre coste que esto implica.
- ❖ La comunidad elegirá el tipo de mantenimiento que desee y quien lo realizará.
- ❖ La comunidad deberá ser capaz, y pagará todas las reparaciones que hagan falta una vez puesto en marcha el sistema.

La aplicación del concepto VLOM produjo un aumento considerable en el éxito de los proyectos de abastecimiento. Se pasó de un 25 – 50% de equipos operativos a un mismo tiempo en la década de los 70 a alcanzarse un 80 – 90% en proyectos VLOM durante la década del agua (1980-90).

3.4 Tecnologías para la Captación de Aguas Subterráneas

Como ya se ha venido nombrando hay distintas opciones tecnológicas que pueden cumplir los principios VLOM, en este punto se va a describir cada una de ellas, su potencial y capacidad como solución al problema del abastecimiento.

3.4.1 Acceso al agua. Pozos

Tan importante como la tecnología de bombeo empleada es la construcción de un pozo que permita la accesibilidad al agua. Los conceptos VLOM también se han extendido a la perforación y excavación de pozos. Desgraciadamente esta fuera del alcance del proyecto un estudio detallado de las distintas tecnologías implicadas. Tan solo apuntar que la posibilidad, o elección de un tipo de pozo u otro condiciona tanto los costes del proyecto, como las tecnologías de bombeo aplicable, e incluso la contaminación o no del acuífero.

	Cavado manual	Perforación manual	Equipo de perforación con cable	Perforadora rotativa pequeña	Perforadora rotativa de usos múltiples
Gastos de inversión aproximados en dólares estadounidenses	\$1.000	\$1.000-5.000	\$20.000-100.000	\$100.000-250.000	\$200.000-500.000
Costo de operación	muy bajo	bajo	bajo	mediano	muy elevado
Capacitación operativa	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Aptitudes para las reparaciones	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Respaldo complementario	muy bajo	bajo	bajo-mediano	mediano	muy elevado
Tasas aproximadas de penetración en metros por cada día de 8 horas de trabajo	0,1-2,0m	1-15m	1-15m	20-100m	20-100m
Pozos de 200 mm* de diámetro a 15m de profundidades en formaciones no consolidadas	-	veloz	veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 200 mm* de diámetro a 50m de profundidades en formaciones no consolidadas	-	lento y difícil	bastante veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 200 mm* de diámetro entre 15 y 50m de profundidades en formaciones semi consolidadas	-	imposible	bastante veloz	imposible	muy veloz**
Pozos de 100 mm* de diámetro entre 15 y 50m de profundidades en formaciones consolidadas (duras, no las de grava apisonada)	-	imposible	muy lento	muy veloz**	muy veloz**
* pozos de 200 mm para construir un pozo de 100 mm de diámetro tras la instalación de filtros el apisonamiento de la grava. ** supeditado al apoyo logístico					
De: Arlosoroff, S., et al, Community Water Supply, The Handbomba Option, PNUD/Banco Mundial					

Tabla 6: Tecnologías de construcción de pozos (UNICEF 1999).

3.4.1.1 Pozos y bombeo manual

La elección de un tipo de pozo u otro depende del tipo de terreno, de la profundidad de la capa freática y de los medios técnicos disponibles. Según el concepto VLOM siempre se deberá buscar la opción que implique en mayor medida a la comunidad pero sin que esto perjudique el funcionamiento global de la instalación. Un pozo cavado a mano puede ser fácilmente construido con un pequeño entrenamiento por la población local mientras que para manejar una perforadora rotativa hace falta personal experimentado, y grandes recursos logísticos. Es habitual en los países en desarrollo que las perforadoras estén infrautilizadas por la falta de repuestos y combustible o por la ausencia de mano de obra capaz de manejar los equipos. Para el bombeo manual se puede usar indistintamente un tipo de pozo u otro con escasas modificaciones. En la figura 5 y figura 6 se ven las partes principales del pozo y las distintas técnicas de construcción de pozos.

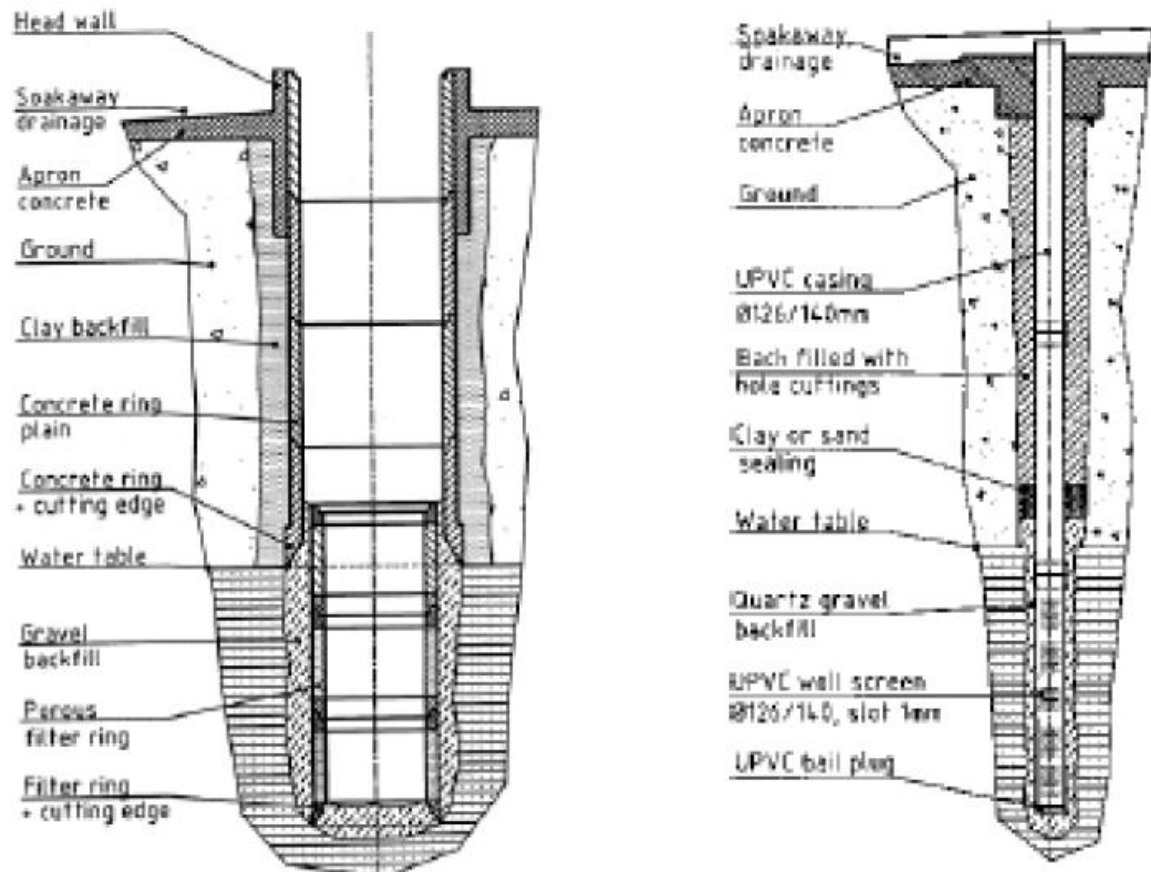


Figura 5: Pozo excavado / Pozo perforado (Baumann, 2000).

Un aspecto fundamental en el diseño de un pozo y la posterior instalación de una bomba manual para su aprovechamiento es la profundidad a la que debe situarse el pistón respecto al nivel de agua. Este parámetro depende del tipo de pozo, del terreno, y de la bomba empleada.

En cualquier instalación se definen dos niveles de agua, el nivel estático (Static Water Level) que es el nivel de la capa freática en la estación seca y el nivel dinámico de agua (Dynamic Water Level) que sirve para contabilizar el descenso de nivel al producirse bombeo. El valor del DWL, también conocido por PWL (Pumping Water Level) oscila según la permeabilidad del terreno, el tipo de pozo en el que nos encontremos y el caudal bombeado. También se conoce como factor de recarga.

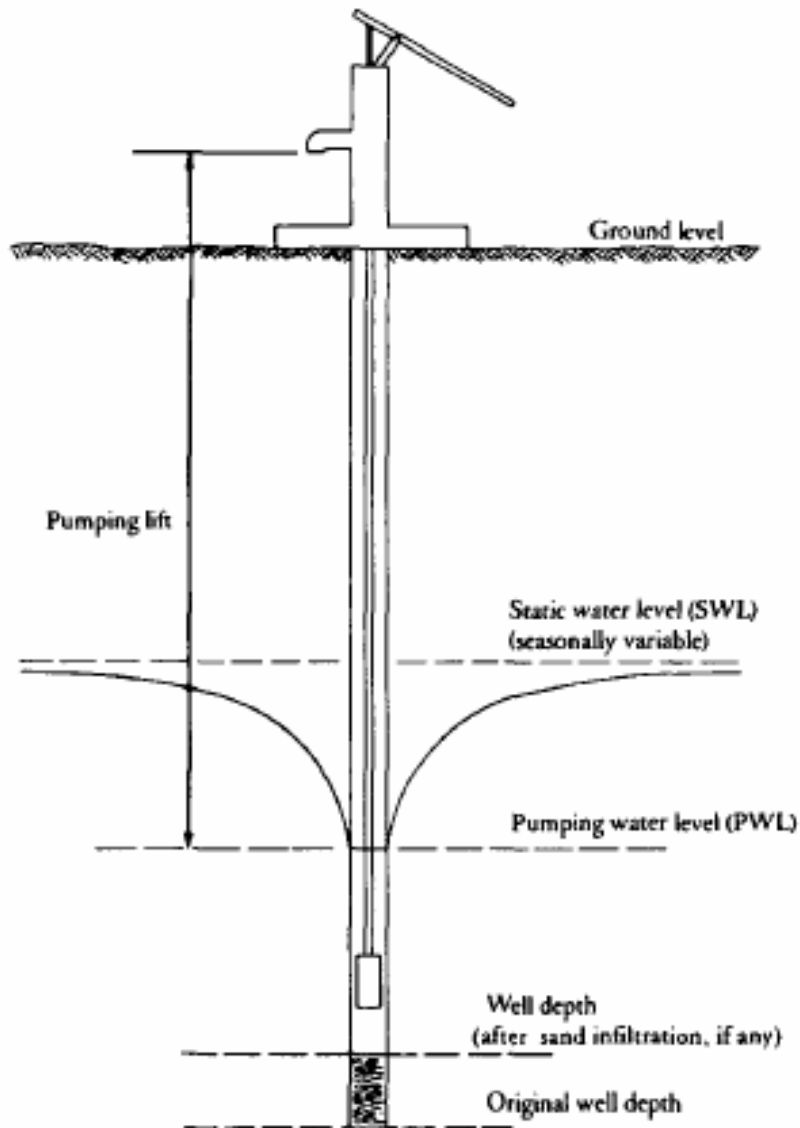


Figura 6: Niveles de agua subterránea (Reynolds, 1992).

Es difícil encontrar documentación que aconseje una diferencia mínima entre la posición del pistón y el DWL o el SWL. Generalmente se recomienda dejar la mayor profundidad posible. A modo orientativo se puede aventurar que la diferencia no debe ser menor a un metro respecto al DWL en pozos excavados, y superior a 5 – 6 metros en caso de pozos perforados si la permeabilidad del terreno es alta.

3.4.2 Tecnologías de bombeo

En este apartado veremos de forma rápida los diferentes tipos de bombas existentes en el mercado.

- **Bombas manuales de succión:** Las bombas de succión tienen el cilindro en el cuerpo de la bomba, el agua es succionada por la depresión creada por el pistón. En teoría la profundidad máxima de bombeo son 10m. Por su bajo precio y bajo mantenimiento se suele recomendar para pequeños grupos de usuarios, familias, con no más de 50 – 70 usuarios por bomba.
- **Bombas manuales de acción directa:** Las bombas de acción directa basan su funcionamiento en una varilla hueca unida a un pistón, directamente accionada por el usuario. El cuerpo de la bomba suele estar hecha de acero y la varilla de plástico. Estas bombas son resistentes a la corrosión. La profundidad máxima de bombeo es de 15 metros pero no está recomendado su uso para profundidades superiores a 12 metros. Existen diseños aptos para su empleo familiar (50 – 70 usuarios) y para su empleo comunitario (hasta 300 usuarios). El diseño de estas bombas ha estado propiciado por los problemas que presenta la bomba de succión.
- **Bombas manuales de pozo profundo:** Las bombas de pozo profundo son, en su mayoría bombas accionadas con palanca aunque también existen de rueda y de pie. Si se emplea acero galvanizado no son resistentes a la corrosión por lo que se necesita el uso de otros materiales. Para instalaciones en pozo abierto y/o muy profundo es necesario un sistema auxiliar de sujeción.
- **Bombas hidroeléctricas:** Cuando la extensión de la red eléctrica de un país lo permite, las bombas hidroeléctricas presentan unas condiciones favorables para su instalación en comunidades medianas o grandes. La instalación de este tipo de sistemas sólo está justificada cuando la comunidad receptora cumple los requisitos organizativos, económicos y un estudio demuestra que el acuífero tiene capacidad suficiente.
- **Bombas con paneles fotovoltaicos:** Existen dos tipos de bombas solares fotovoltaicas. El primero, mediante un inversor funciona con una bomba AC hidroeléctrica sumergida, el segundo opera directamente con una bomba DC. La bomba funciona automáticamente cada vez que el sol lo permite. El mantenimiento es prácticamente nulo. Requieren de un depósito intermedio y es aconsejable la instalación de una red de distribución.

- **Bombas eólicas:** Las bombas eólicas normalmente tienen un rotor o molino con varios álabes de acero, que a través de una caja reductora mueven directamente un pistón o un mecanismo de bombeo. Resultan algo caras para la potencia que desarrollan. Requieren de un depósito de agua para asegurar el suministro y satisfacer los picos de demanda. Suelen llevar asociada una red de distribución de agua.

3.4.3 Conclusiones

En la descripción de las tecnologías existentes se aprecian grandes diferencias en cuanto a nivel de servicio de unas tecnologías u otras. El nivel de servicio, el tipo de conexión y las implicaciones logísticas y sociales de cada técnica es diferente y satisface un escalón distinto en el objetivo del abastecimiento. Aquí únicamente se han expuesto las principales características sin entrar en un desarrollo detallado.

Apuntar tan sólo que el índice de éxito de los proyectos con bomba manual suele ser mayor que el de otras opciones debido a su sostenibilidad y el alto grado de aceptación que consigue en las comunidades beneficiarias. Según la SKAT, las bombas manuales son la mejor alternativa cuando se empieza a desarrollar un sistema de abastecimiento de agua, y sólo recomiendan una tecnología superior cuando la comunidad se exprese a favor y asuma los retos económicos y organizativos que la instalación de ésta supone. Están documentados múltiples casos en los cuales las comunidades rechazan o ignoran costosos sistemas de abastecimiento mediante bombas hidroeléctricas, diesel o solares y en cambio sí aceptan bombas manuales que llegan a asimilar como un elemento más de la comunidad. Una vez más el uso de tecnología apropiada y las directrices VLOM resultan una guía indispensable para el éxito de un proyecto de abastecimiento.

En las siguientes figuras se muestra unos gráficos orientativos elaborados por la SKAT, con los costes típicos de adquisición, operación y mantenimiento de cada sistema en \$US per cápita.

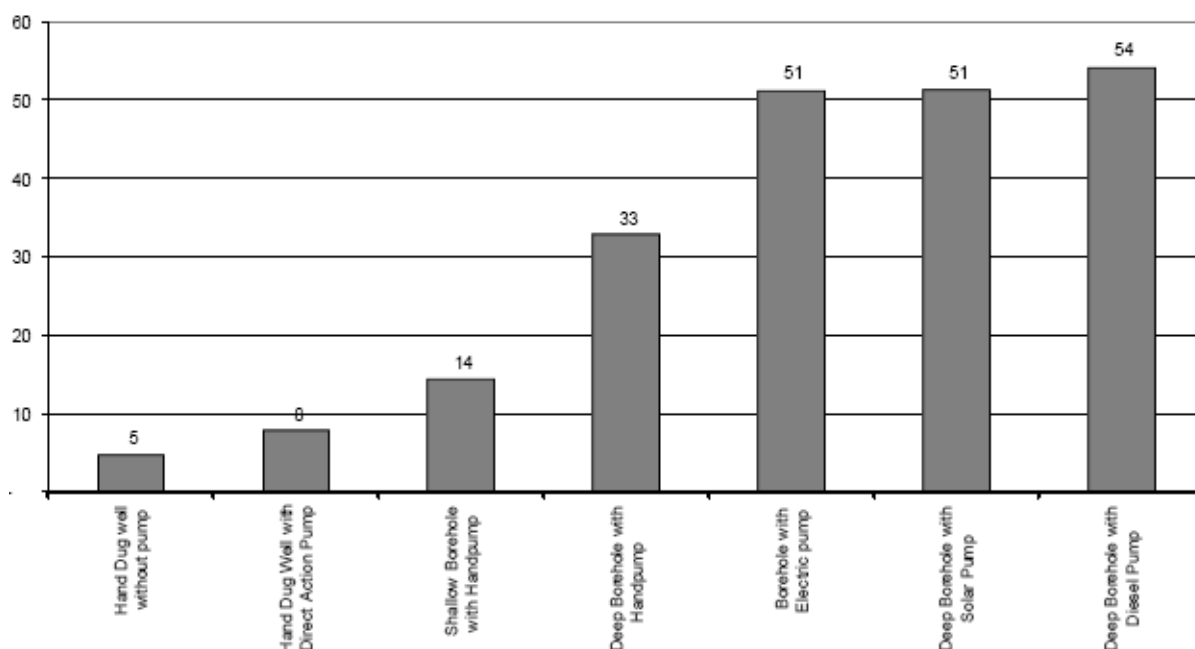


Figura 7: Coste per cápita (\$US) de los diferentes sistemas de bombeo (Baumann, 2000).

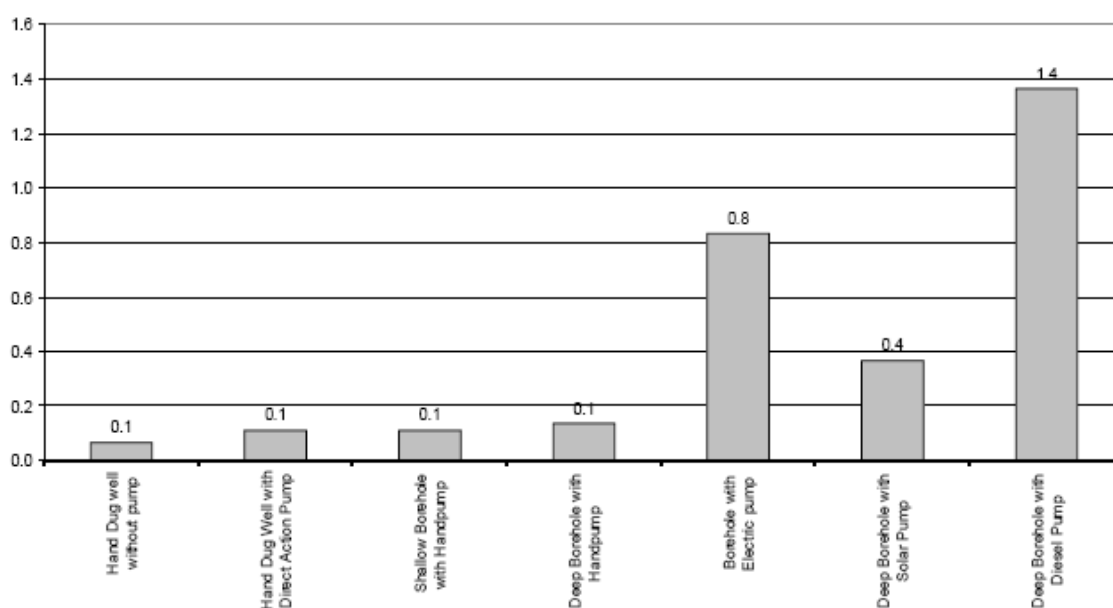


Figura 8: Costes de mantenimiento per cápita (\$US). (Baumann, 2000).

Organizaciones como el UNICEF o el Banco Mundial también defienden y propugnan la bomba manual como la herramienta más efectiva para mejorar el abastecimiento de agua en las zonas rurales de los países en desarrollo.

3.5 Esfuerzo Aplicado al Bombeo Manual

El principal operador de una bomba manual es el hombre. Por lo tanto el diseño y manejo debe estar orientado a facilitar su manejo por el mismo. Sin elemento motor, el esfuerzo que aplica una persona al manejar una bomba manual es función de la profundidad de bombeo y el caudal bombeado, y éstos están relacionados por el diseño de la bomba.

$$W_{bombeo} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}{\eta_{bomba}}$$

Y a su vez el esfuerzo que aplica una persona es función de la fuerza que aplica y la velocidad con la cual la aplica.

$$W_{bombeo} = F_{aplicada} \cdot v$$

Así el ser humano tiene limitada su capacidad de esfuerzo por la fuerza máxima que es capaz de aplicar y por la velocidad de sus movimientos. A parte, múltiples factores físicos y circunstanciales afectan al esfuerzo aplicado, siendo los más importantes:

- ✓ La economía de movimientos, individualmente diferente.
- ✓ Los factores constitucionales, edad, sexo, etc.
- ✓ La condición física y psíquica, en dependencia al nivel de entrenamiento, las condiciones de vida y trabajo, la alimentación, etc.

En los trabajos del Banco Mundial y el Consumer Research Laboratories se tomó como frecuencia típica de bombeo 40 pulsaciones minuto, 50 se consideró un valor apto pero elevado y 80 el máximo valor con el que se experimentó (Reynolds, 1992), por considerarse poco probable que un ser humano desarrollase esfuerzos mayores.

Como valores de referencia se han tomado las siguientes tablas elaboradas por Tomillo, y que se consideran perfectamente válidas para el ámbito del bombeo manual.

Sexo	Edad	Ergonomía		T	Humedad relativa	Tiempo bombeo	Alimentación	Condición física	Potencia nominal
Hombre	20-30 años	Buena	Brazos	20°C	Media	<15min	Adecuada	Normal	2W/Kg
			Pedaleo						2,6W/Kg
Mujer			Brazos						1,5 W/Kg
			Pedaleo						2 W/Kg

Tabla 7: Potencia nominal de un usuario en el empleo de una bomba manual (Tomillo, 2006).

De acuerdo con la tabla 8, una mujer de 55kg de peso es capaz de, en plenas condiciones físicas de desarrollar una fuerza de 82,5W durante un tiempo inferior de 15min. Sabiendo que el tiempo de bombeo típico es superior a 15min más el tiempo y esfuerzo de desplazar el agua al hogar, la conclusión es que la potencia desarrollable por una persona está limitada y se resalta una vez más la importancia de facilitar el esfuerzo y reducir las distancias entre el punto de suministro y los usuarios.

En la siguiente tabla se expresa de manera resumida la todos los factores que limitan la capacidad de esfuerzo en el bombeo manual.

%		Hombre					Mujer				
Edad		<14	14-20	20-30	30-40	>40	<14	14-20	20-30	30-40	>40
		75	90	100	90	75	85	90	100	85	70
Distancia media a la fuente	< 5min	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<60min	80	90	95	90	80	80	90	95	85	75
	>60min	60	70	80	80	65	60	70	80	75	60
Tiempo de bombeo	<15min	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<30min	80	90	95	90	75	80	90	95	85	70
	>30min	60	70	80	80	65	60	70	80	75	60
Ergonomía del equipo	Media	90	95	100	95	90	90	95	100	90	85
	Baja	85	90	95	90	85	85	90	95	85	80
Temperaturas	Altas	85	90	95	90	85	85	90	95	85	80
Humedad relativa	Alta	80	90	95	90	85	80	90	95	85	80
Alimentación	Mala	80	90	95	90	85	80	90	95	85	80
Condición física	Mala	80	90	95	90	85	80	90	95	85	80

Tabla 8: Porcentaje de potencia desarrollable que se alcanza respecto al valor de la potencia nominal, por una usuaria de una bomba manual, para distintos factores condicionantes. (Tomillo, 2006).

En la siguiente tabla se proponen los valores de referencia de distintos usuarios.

	Parte del cuerpo empleada	Potencia desarrollable
Hombre	Piernas: pedaleo	100 W
	Brazos: manivela, palanca	70 W
Mujer	Piernas: pedaleo	75 W
	Brazos: manivela, palanca	50 W
Niña/niño	Piernas: pedaleo	65 W
	Brazos: manivela, palanca	40 W

Tabla 9: Potencia desarrollable de referencia en el empleo de bombas manuales en países del tercer mundo, (Tomillo, 2006).

4. Instalación

4.1 Bomba manual Afridev

4.1.1 Introducción:

Como ha sido mencionado antes, el proyecto que estamos realizando consta del estudio del comportamiento de una bomba manual, en nuestro caso, una bomba Afridev, cuyas dimensiones técnicas y especificaciones de montaje se encuentran en el anexo.

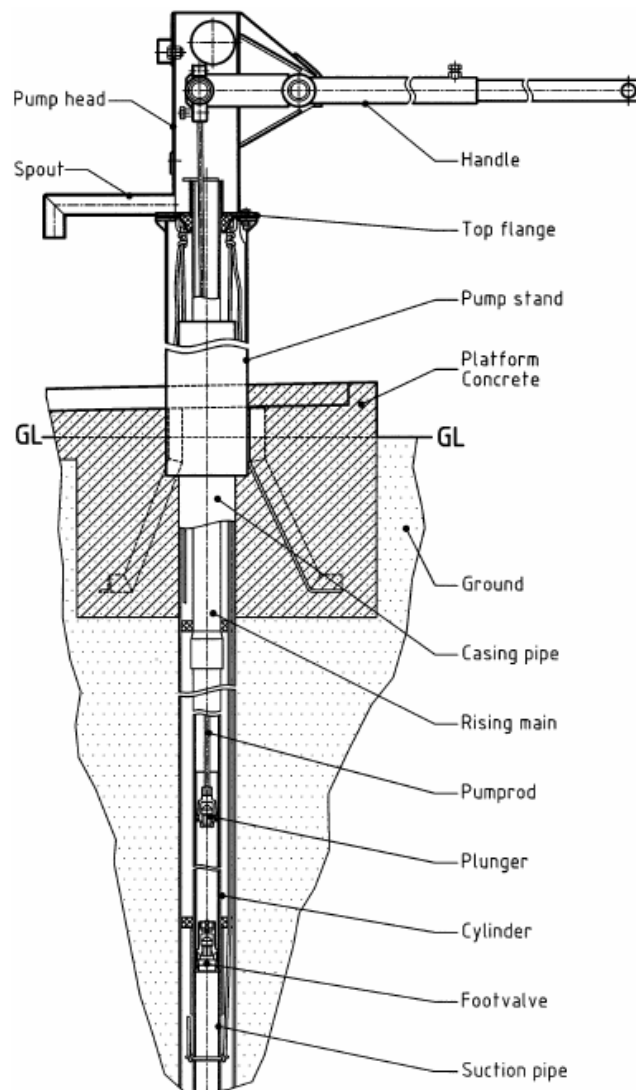


Figura 9: Afridev pump.

Este tipo de bomba, es una bomba manual que gracias al movimiento de palanca del brazo de la bomba, producido por la fuerza humana, puede elevar agua a gran profundidad. El mecanismo de bombeo consta de un eje de acero unido a un pistón móvil y otro pistón fijo situado en el fin de la tubería, ambos con una válvula de pie. Gracias al movimiento de traslación del pistón móvil (carrera del pistón), y debido a la depresión producida entre ambos lados de este, el agua asciende una cantidad igual al volumen de la carrera del pistón móvil, este proceso se puede observar en la siguiente imagen.

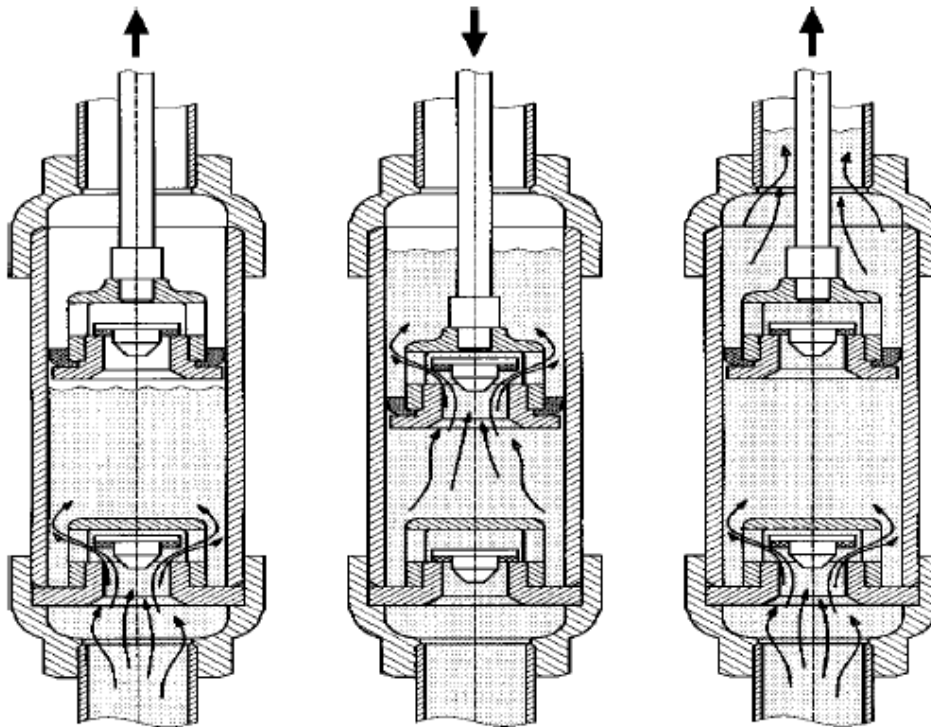


Figura 10: Principio de bombeo.

Comprendido el proceso de bombeo de este tipo de bomba, a continuación observaremos sus principales datos técnicos y principales materiales:

Datos técnicos:

- Diámetro del cilindro (mm): 50.
- Carrera máxima del pistón móvil (mm): 225.
- Altura de bombeo (m): 10-45.

- Caudal de bombeo(m^3/h):
 - Hasta 10 metros: 1,4 (m^3/hora).
 - Hasta 15 metros: 1,1 (m^3/hora).
 - Hasta 20 metros: 0,9 (m^3/hora).
 - Hasta 30 metros: 0,7 (m^3/hora).
- Población abastecida (approx.): 300 personas.
- Consumo de agua: 15-20 l/persona.

Materiales:

- Cuerpo de la bomba: acero galvanizado.
- Brazo de la bomba: acero galvanizado.
- Carcasa de la bomba: Acero galvanizado.
- Eje de bombeo: acero inoxidable.
- Tubería de bombeo: PVC.

4.1.2 Características de nuestra instalación.

Centrándonos más en nuestra instalación, hay varias opciones de montaje de la bomba Afridev a pie de campo. Comenzamos por la elección de las dimensiones del cuerpo de la bomba, en nuestro caso optamos por la opción “a”.

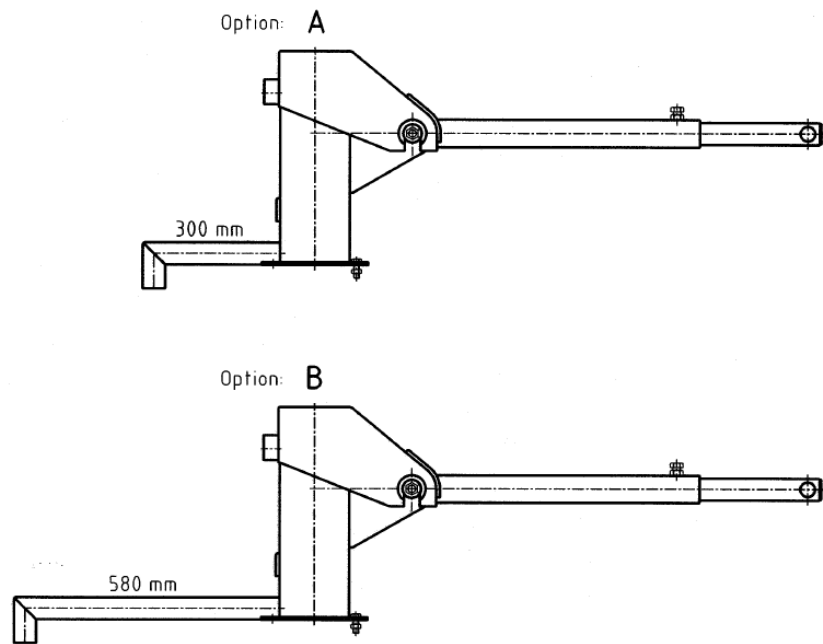


Figura 11: Tipos de cuerpo de la bomba.

Seguimos con la elección del tipo de agarre del conjunto de la bomba a la plataforma de cimentación, de lo que elegimos la opción “a”, ya que es la que más se ajusta a las características del laboratorio.

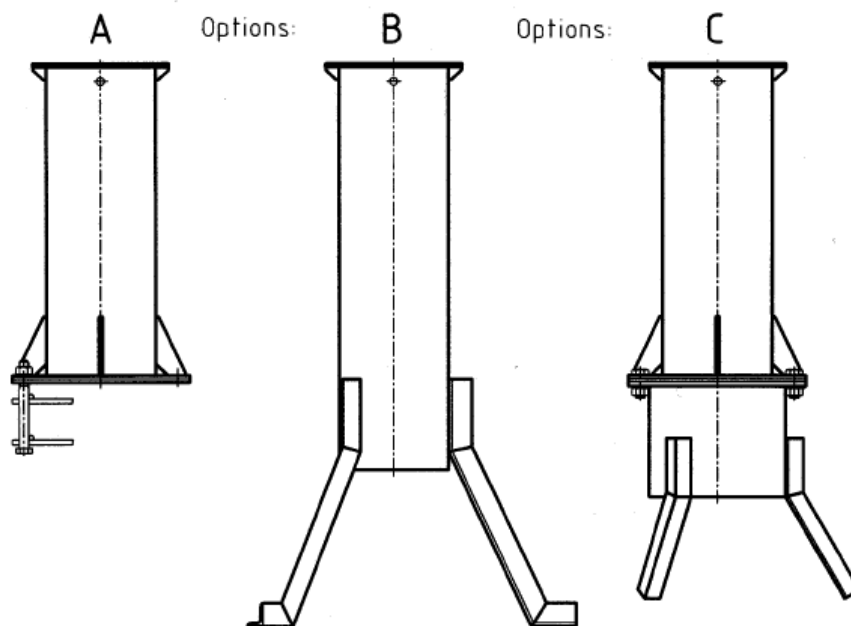


Figura 12: Tipos de agarre al terreno.

También debemos especificar como será las uniones entre los distintos tramos de la tubería de bombeo, en nuestro caso nos hemos decantado por la opción “b”.

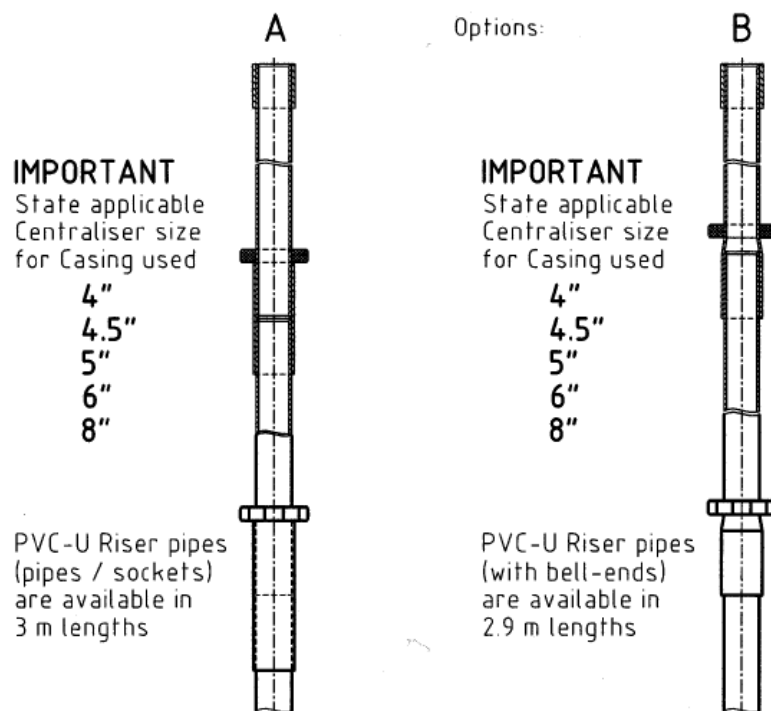


Figura 13: Uniones de los tramos de tubería.

Por ultimo debemos seleccionar el tipo de pistones, tanto el fijo como el móvil, así como su estructura y su mecanismo de anclaje para su correcto desmontaje a pie de campo, que veremos a continuación, en este caso optamos por la opción “b”. Además de elegir el tipo de unión de los distintos tramos del eje de acero, ya que solo disponemos de tramos de 3 metros de distancia, además elegimos que el acero sea inoxidable, por lo tanto nos decantamos por la opción “b”.

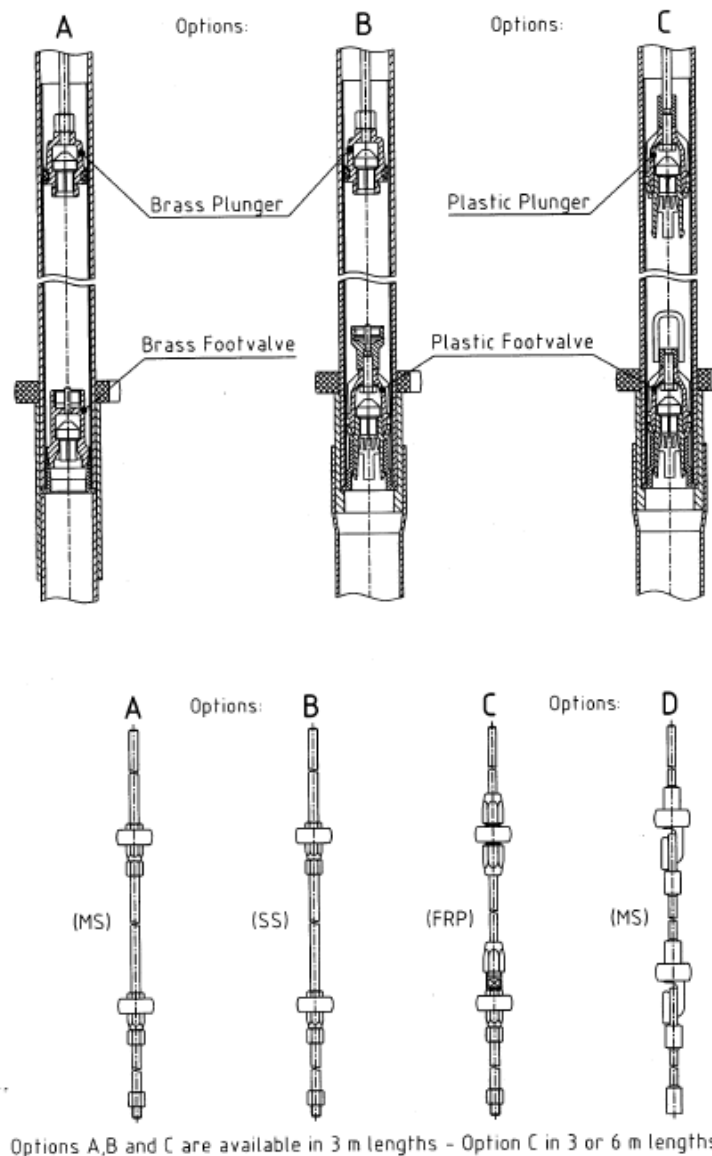


Figura 14: Tipos de pistones (fijos y móviles), tipos de eje.

Estas serían las partes básicas de la bomba, a la vez que las más importantes, ya que comprendiéndolas podremos visualizar mejor su funcionamiento interno.

Esta es una instalación que está preparada para una fácil implantación a pie de campo (contando con ayuda de la población autóctona), y lo que es más importante un fácil mantenimiento, que en la mayoría de los casos correrá a cargo de un miembro de la población que se beneficie de ella, con una formación previa.

Debido a este último apartado la bomba cuenta, aparte de todos sus elementos, con ciertas ventajas que facilitan su mantenimiento, así la bomba cuenta con una única herramienta para su posterior mantenimiento. Se trata de una herramienta robusta fabricada para tener una vida de trabajo lo más grande posible, y con la que se puede realizar el desmontaje total de la instalación hasta conseguir la última pieza del

sistema (pistón fijo), en caso de que sea necesario para una posible reparación o sustitución.



Figura 15: Herramienta de mantenimiento de la bomba Afridev.

Pero no solo contamos con esa ventaja que nos facilita su fácil mantenimiento por parte de gente no especializada en el campo, además el sistema de bombeo, que consta del eje unido al pistón móvil, así como el pistón fijo anclado en la parte inferior de la tubería, puede ser extraído de la instalación sin necesidad de volver a abrir el pozo o extraer todo el conjunto, con la tubería de bombeo incluida.

El citado sistema de bombeo consta con una unión macho-hembra, mediante una rosca entre la parte inferior del pistón móvil y la zona superior de la válvula de pie (pistón fijo), anclada en la parte inferior de la tubería, gracias a la cual, desde la parte superior de la instalación y mediante el eje podemos unir los dos pistones y conseguir extraer la válvula de pie fija unida ahora al pistón móvil.



Figura 16: Mecanismo de extracción del pistón móvil.

Este proceso de desmontaje a pie de campo lo vemos con más detalle en el siguiente apartado.

4.1.3 Mantenimiento a pie de campo.

Debido a que el mantenimiento de la instalación implantada a pie de campo debe correr a cargo de la población autóctona, a la que se le dará la formación necesaria para su correcto funcionamiento y autonomía.

Por ello la bomba implantada está preparada para que en caso de avería, el arreglo o sustitución de la pieza defectuosa se pueda realizar de forma segura y sin demasiada dificultad. Suponiendo que en el peor de los casos, la pieza averiada sea la más alejada del nivel del terreno, es decir la válvula de pie fija, el consiguiente desmontaje de la instalación se realizaría de la siguiente forma.

4.1.3.1 Desmontaje:

Comenzaríamos por liberar el eje del brazo de la bomba, y desacoplar este del cuerpo de la bomba. Lo podemos observar en la siguiente secuencia de imágenes.

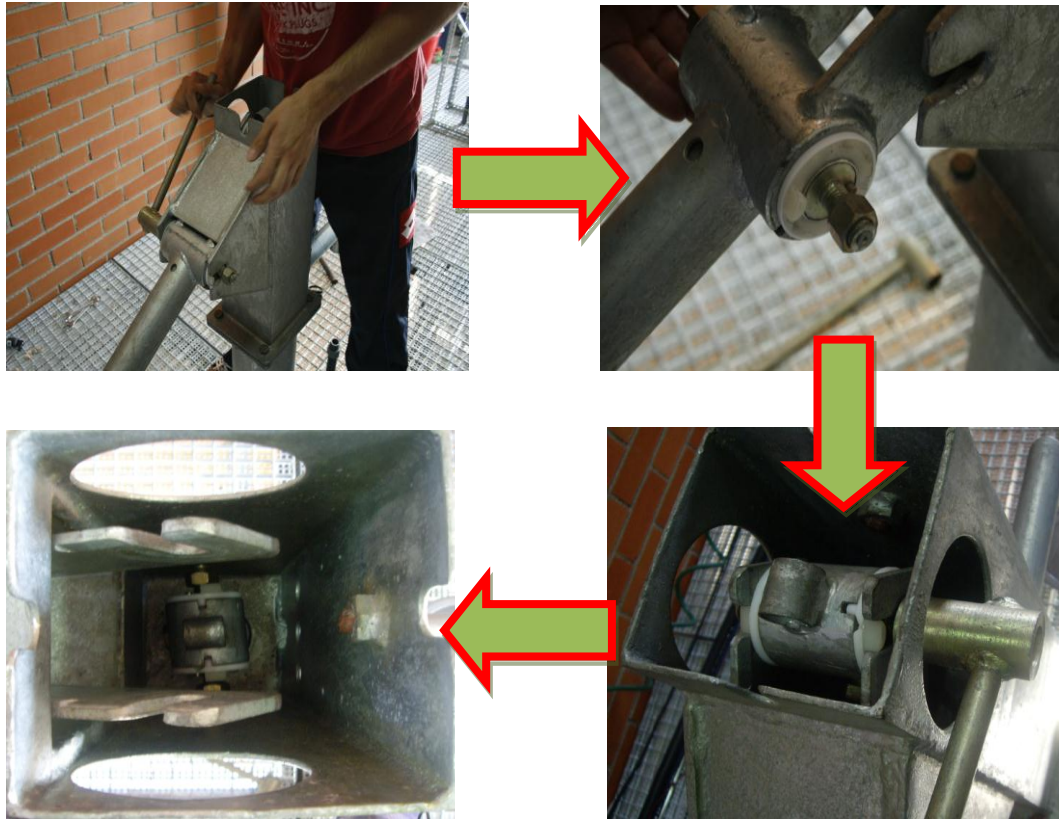


Figura 17: Desacoplamiento del eje del brazo de la bomba y del eje de bombeo.

Merece mencionar que el acoplamiento eje-brazo consiste en una pieza que permite el movimiento oscilante del brazo, a la vez que exista una correcta perpendicularidad del eje de bombeo. En la imagen de a continuación podemos ver con más detalle la pieza nombrada.



Figura 18: Pieza de anclaje eje-brazo.

Con lo cual al final nuestra barra (eje) estará libre, por lo que lo siguiente será desacoplarla de la pieza de sujeción de ésta al brazo. Debemos resaltar que todas estas operaciones son notablemente sencillas, ya que sus uniones son similares y en la gran parte las mismas, con lo que necesitamos una única herramienta. En la siguiente imagen resaltamos la unión de esta pieza con el eje, mediante un tornillo que sostenga el nombrado eje.



Figura 19: pieza de acoplamiento del eje con el brazo de la bomba.

Tras esto podemos desacoplar el cuerpo de la bomba, de igual modo consta de cuatro uniones sencillas, tornillo-tuerca.



Figura 20: Desmontaje del cuerpo de la bomba de la base de la misma.

Al retirar el cuerpo de la bomba del sistema podemos pasar a operar con nuestro sistema de tuberías, desacoplando las diferentes juntas previas, que poseen la función de centrar la tubería, así como fijar su posición longitudinalmente en el interior del pozo.

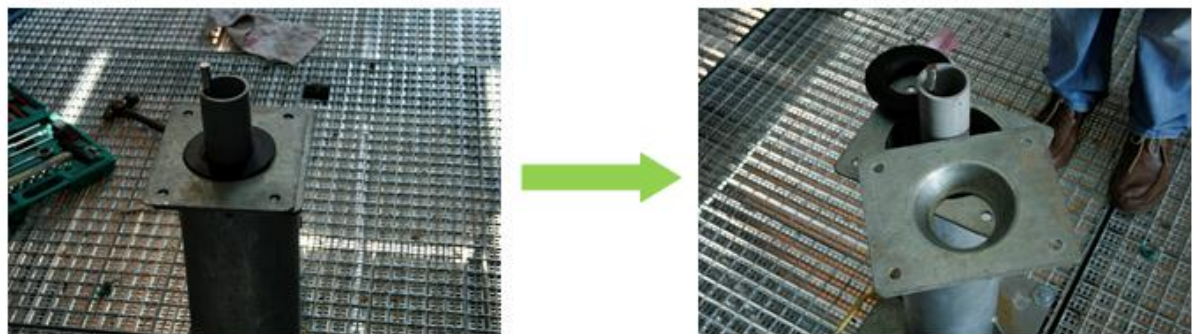


Figura 21: Primera parte de la tubería de ascensión y juntas

Lo que podemos observar en la imagen superior es el primer tamo del sistema de tuberías, el cual está correctamente sujeto mediante una junta de caucho, que permite, además de la correcta sujeción de la tubería, absorber las posibles vibraciones producidas por el constante movimiento del brazo.

El siguiente paso será rescatar tanto el eje de bombeo, el cual contiene el pistón móvil, como el pistón fijo que se encuentra anclado en la parte más inferior de nuestra instalación. Para este proceso, el cual se debe hacer desde la superficie del terreno, debemos armarnos de paciencia, ya que debemos roscar un macho roscado (pistón móvil) con su correspondiente hembra roscada (pistón fijo), todo ello a unos 40 metros de distancia (en el peor de los casos).

Es un proceso en el que vale más la maña que la fuerza ya que el pistón móvil que se encuentra en la parte inferior de la barra, viene provisto con una rosca macho la cual encaja perfectamente con la rosca hembra del pistón fijo, en cuanto ambas partes estén conectadas, debemos desacoplar el pistón fijo del fondo de la tubería, por lo que mediante un pequeño esfuerzo vertical hacia arriba llegaremos a su desunión, por lo que podemos comenzar la ascensión.

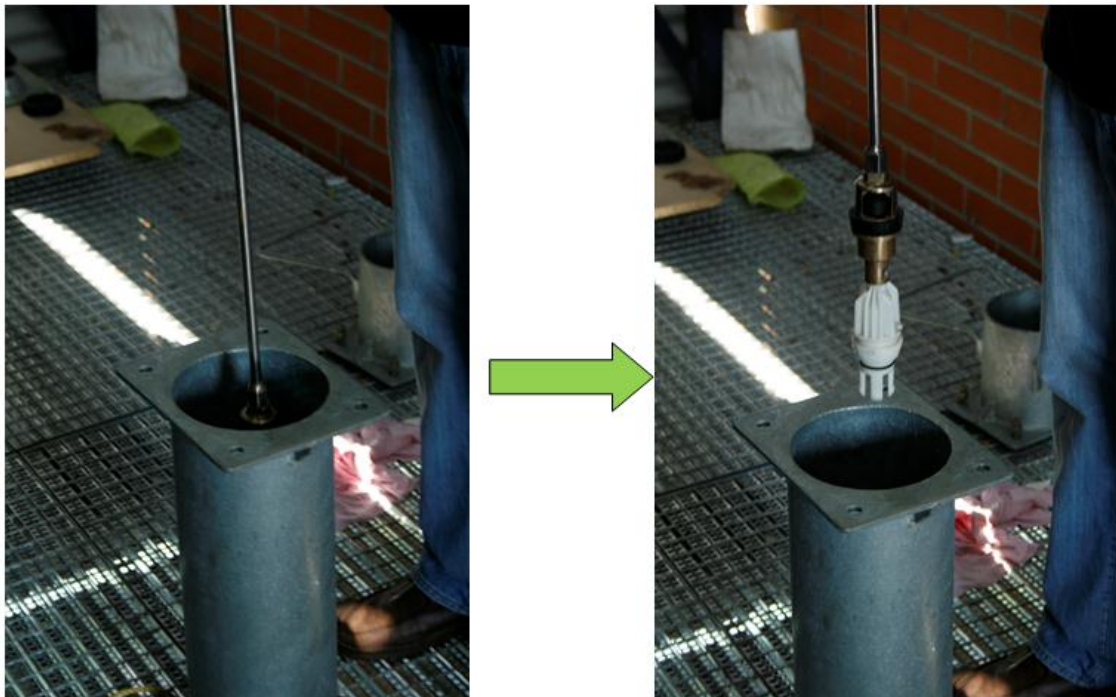


Figura 22: Extracción del eje con los correspondientes pistones.

Extraído el eje con los correspondientes pistones, proseguimos con el último paso del desmontaje, el cual consiste en extraer nuestro sistema de tuberías. Es un proceso sencillo, ya que todo el sistema de tuberías está anclado a una cuerda, la cual esta agarrada en la superficie a la junta que contiene la junta de caucho antes nombrada. Debemos matizar que este último proceso solo sería realizado en el caso que tuviéramos que reemplazar la tubería por daños (poco probable).

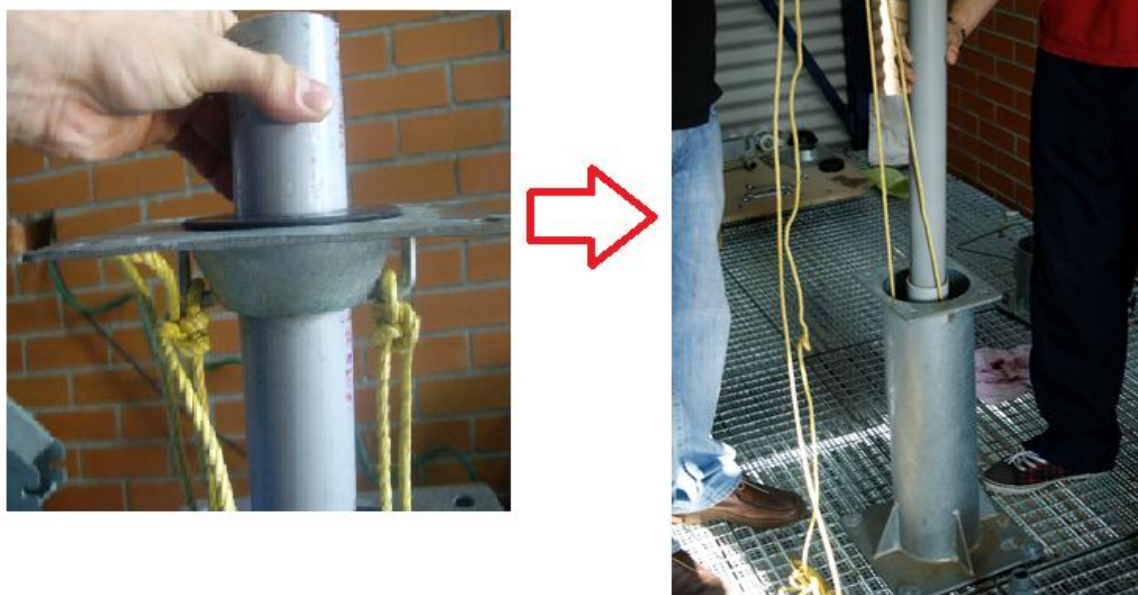


Figura 23: Unión cuerda-junta y extracción de la tubería de bombeo.

Con todos estos pasos tendríamos todas las partes de la instalación de bombeo, a excepción de la base de la bomba, que está unida al terreno mediante una pequeña cimentación. Este proceso de desmontaje dura entre 20 y 40 minutos, dependiendo de la altura del pozo.

Imaginando que el la avería ha sido subsanada, procederíamos al correspondiente montaje del sistema.

4.1.3.2Montaje:

Habiendo realizado el proceso de desmontaje correctamente, el posterior montaje nos resultara muy sencillo. Seria invertir el orden de todos los pasos del desmontaje.

Inicialmente tenemos que montar el sistema de tuberías, para ello, con ayuda de la nombrada cuerda comenzamos a bajar la tubería hasta el punto correcto. Con gran ayuda de personas ya que el peso de 40 metros de tubería en el peor de los casos llegaría a unos 80 kilogramos aproximadamente. Para un mejor montaje, ante de que tengamos la tubería en la posición que queremos, colocamos la junta de caucho para su correcta sujeción.

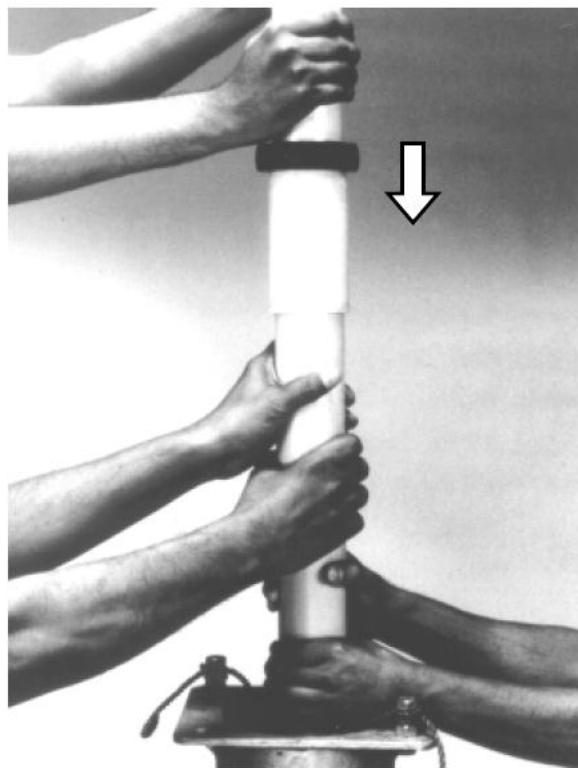


Figura 24: Introducción cuidadosa de la tubería.

Tras ello procedemos a introducir el eje de acero, con el pistón fijo unido al pistón móvil, para en el momento en el que lleguemos al punto de anclaje de éste, con un suave golpe encajarlo correctamente en su posición. Tras encajarlo podemos liberar la barra del pistón fijo (mediante una simple rosca).

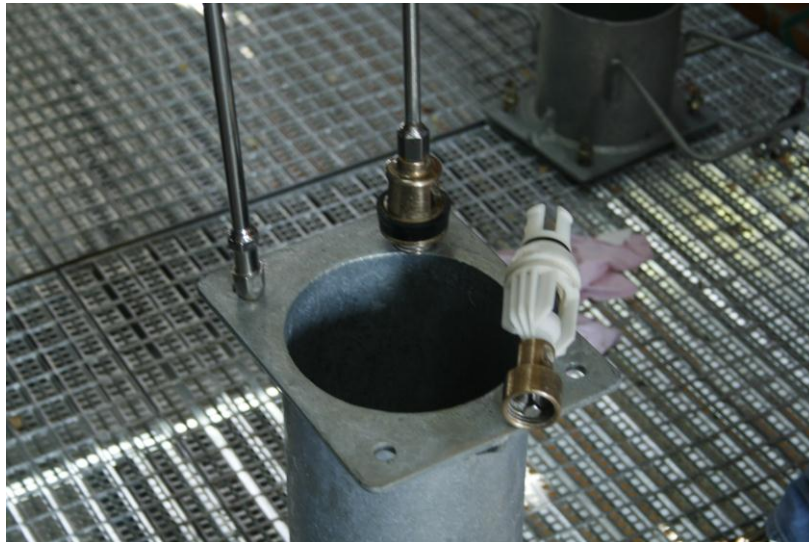


Figura 25: Conjunto del eje y ambos pistones.

El eje posee unas dimensiones características, consta de un primer tramo de 1,15 metros, que incluye el pistón móvil, y los correspondientes tramos de 3 metros de longitud que necesitamos según la altura del pozo. Con lo que para una altura de unos 40 metros como situación más extrema, tendríamos el primer tramo del pistón móvil y 13 tramos de barra de 3 metros cada una, excepto el tramo superficial que será de 2,85 metros.

Las uniones de todos los tramos son mediante un macho roscado y su correspondiente hembra roscada, por lo que las uniones son de mayor diámetro que el propio eje, por ello en cada unión colocamos un centrador de caucho.



Figura 26: Uniones del eje con su correspondiente centrador.

El centrador nos ayudará a centrar el eje en el interior de la tubería, ya que en las uniones se concentran las tensiones del eje, lo que puede provocar una des perpendicularidad del eje en cada unión.

Antes de introducir el eje, debemos realizar dos cosas:

- Unir la válvula de pie fija a nuestro pistón móvil, para que en el momento de llegar al enganche del pistón fijo, mediante un pequeño esfuerzo perpendicular a la base de la bomba encajemos la válvula de pie fija. En ese momento procedemos a separar ambos pistones, al igual que lo mencionamos en el desmontaje, con los pistones libres tenemos el eje preparado para su posterior acople al brazo de la bomba.



Figura 27: Anclaje del pistón fijo, situado en el punto final de la tubería.

- Cuando tengamos unidos correctamente los pistones iremos introduciendo cuidadosamente tramo a tramo todo el eje, teniendo en cuenta que para unos 38 metros tendríamos que poder soportar el eje para colocar el último tramo, lo que equivale a unos 35 kilos de peso.

Realizado estos dos procesos y antes de seguir al siguiente paso (acople eje-brazo), debemos verificar que el eje se encuentre correctamente colocado en su posición específica. El eje debe quedar a la misma altura del punto superior de la tubería.

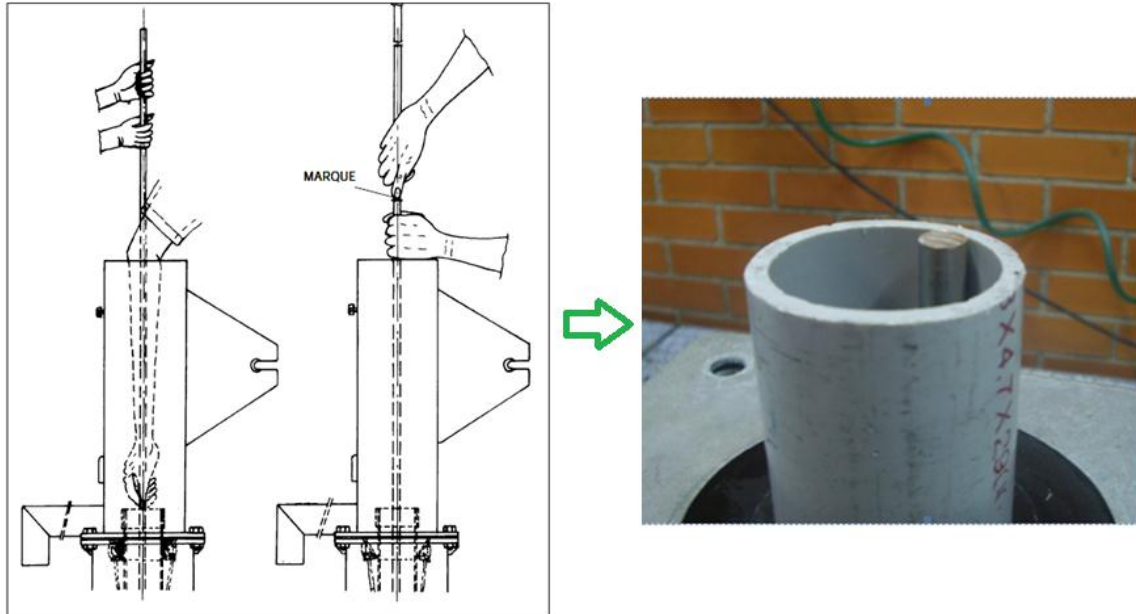


Figura 28: Posición final del eje.

Fijado el eje de acero en su correcta posición, procedemos a la colocación del cuerpo de la bomba, atornillando sus cuatro uniones, hecho esto pasaríamos a acoplar el eje en la pieza de anclaje con el brazo, el acople debe ser hasta el final.

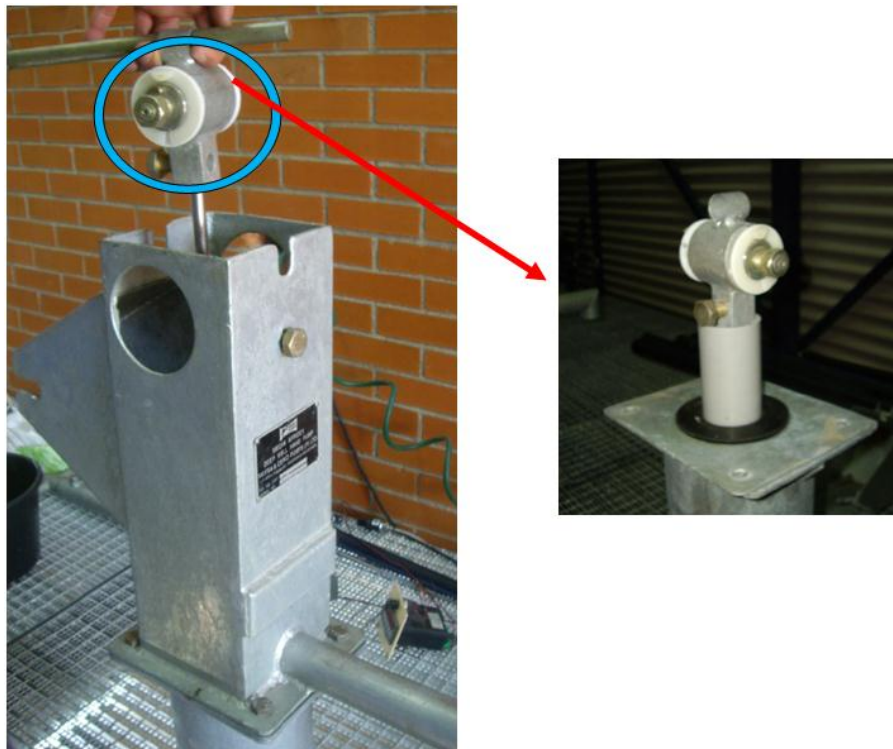


Figura 29: Desacople de la pieza del anclaje eje-brazo y su posición final.

De esta forma ya podemos proceder a unir el eje con el brazo, mediante la pieza de anclaje antes citada, además de fijar el brazo al cuerpo de la bomba mediante sus correspondientes uniones.

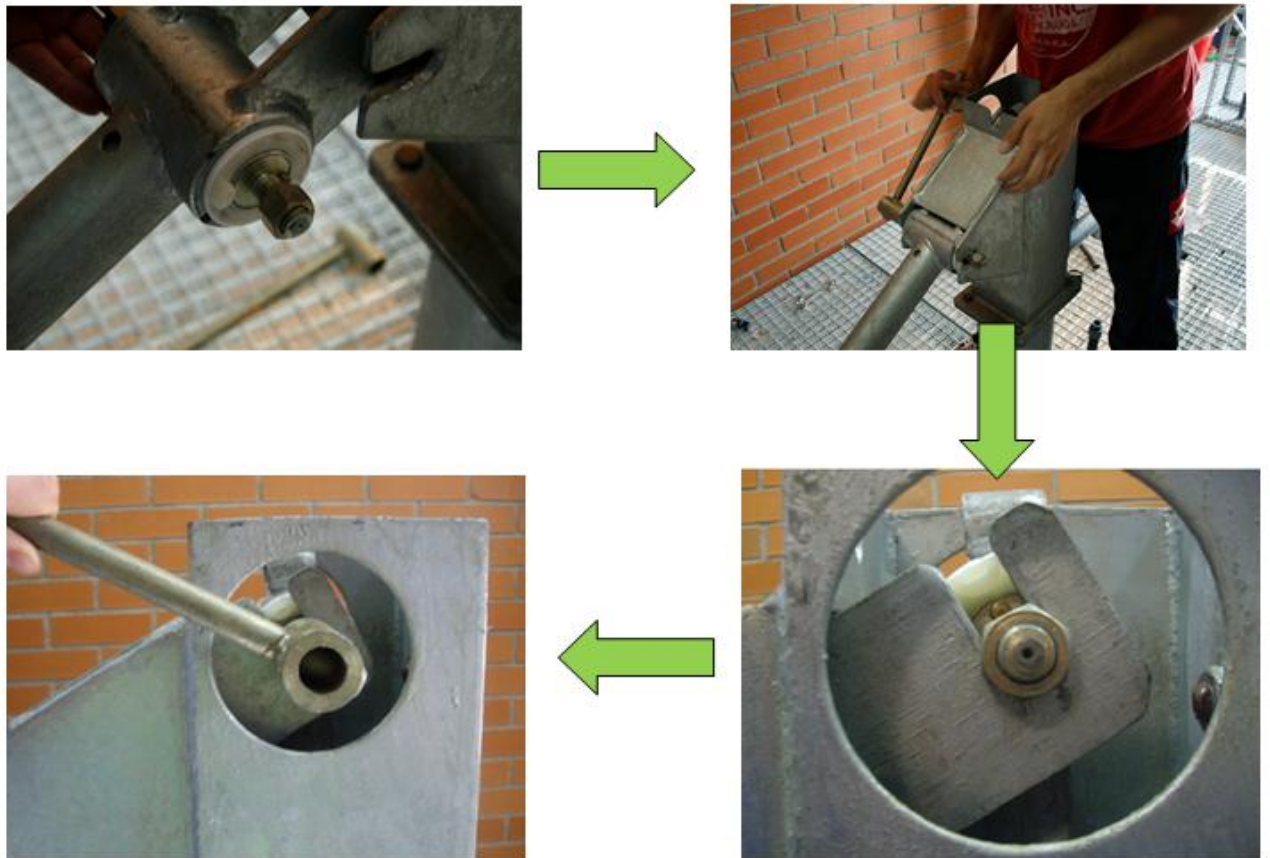


Figura 30: Secuencia de montaje del brazo en la bomba.

De esta forma tendremos la bomba completamente montada, y procederemos a su correspondiente ensayo de funcionamiento, para comprobar que el montaje ha sido correcto. La operación de montaje no debe llevarnos más de 45 minutos, que corresponden al tiempo estimado para 40 metros de profundidad.

4.2 Instalación del laboratorio:

4.2.1 Características

Mención especial tiene la instalación de nuestro proyecto, ya que para el estudio del comportamiento de la bomba en situaciones extremas necesitaríamos la posibilidad de tener una instalación de entre 10 y 40 metros, la nuestra posee 3,54 metros al no ser posible por las características del laboratorio.

Al tener esa mínima altura necesitamos un sistema de simulación de la profundidad de bombeo que queramos, este citado sistema, consta de una ramificación de tuberías de PVC de 25 milímetros de diámetro, una válvula de presión mediante tornillo de 1 pulgada de diámetro, y una llave de paso de bola que nos permita reconducir el agua por la válvula de presión. De esta manera regularemos a nuestra disposición la válvula para simular una presión equivalente a una profundidad de bombeo elegida. Para ello debemos saber cuál es la presión que corresponde a la altura queremos conseguir.

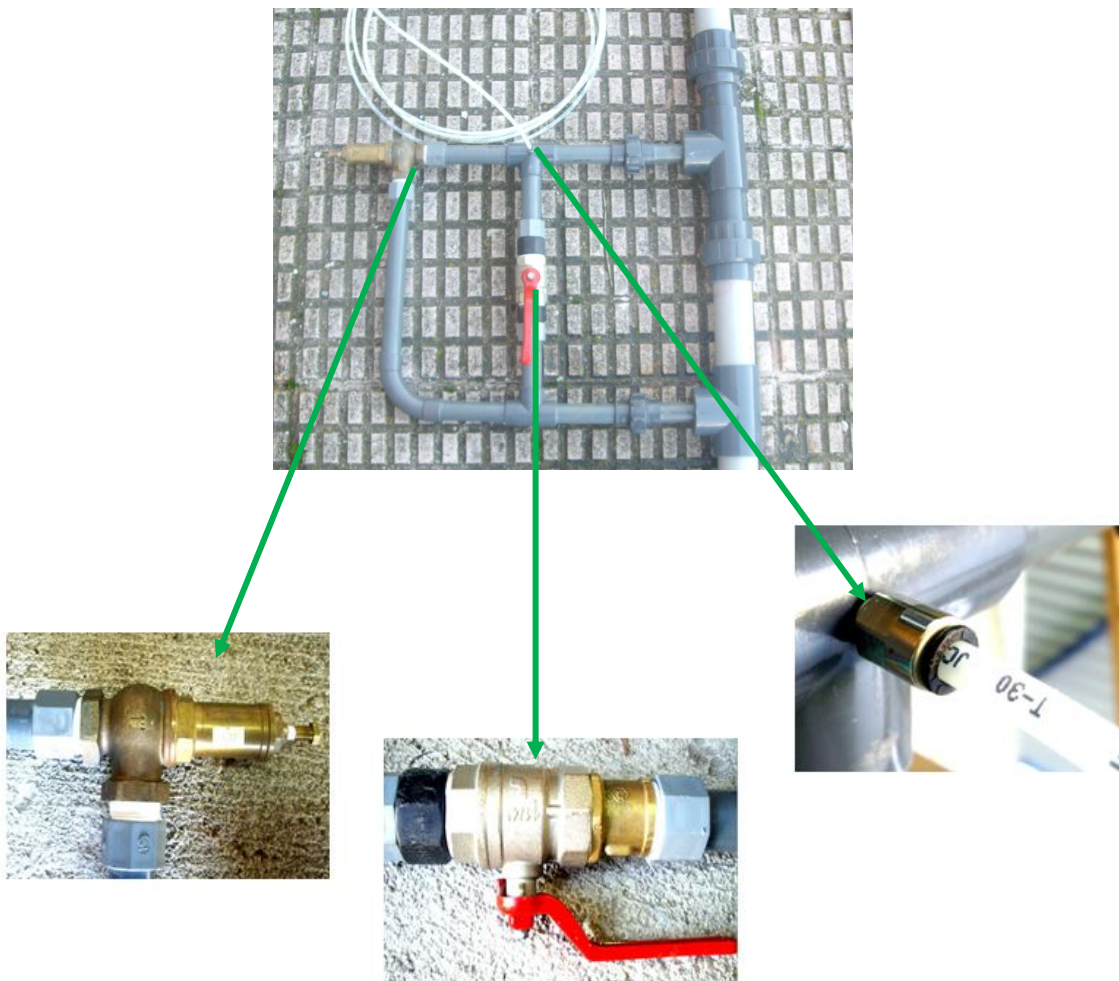


Figura 31: Partes de sistema de presión.

Con lo que diferenciaremos entre dos sistemas de tuberías:

- Tubería de bombeo.
- Tubería del sistema de presión.

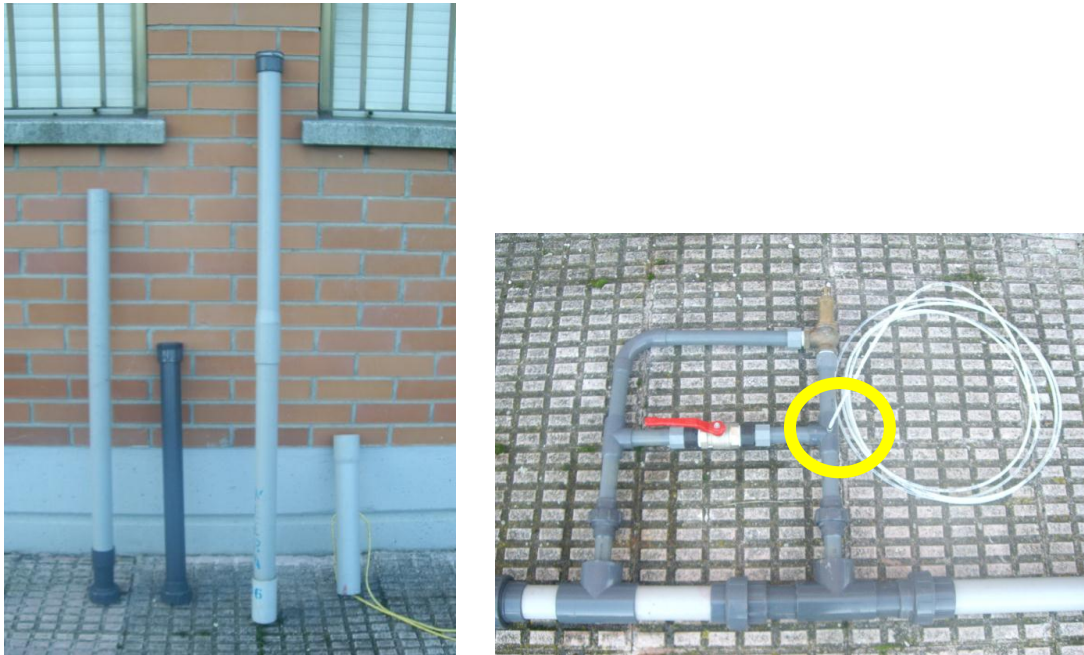


Figura 32: Tubería de bombeo y tubería del sistema de presión.

Para las mediciones de la presión utilizamos un sensor digital conectado a un tubo de plástico hueco que nos conecte el sensor con el punto donde producimos la sobrepresión, este último punto está indicado en la imagen anterior.

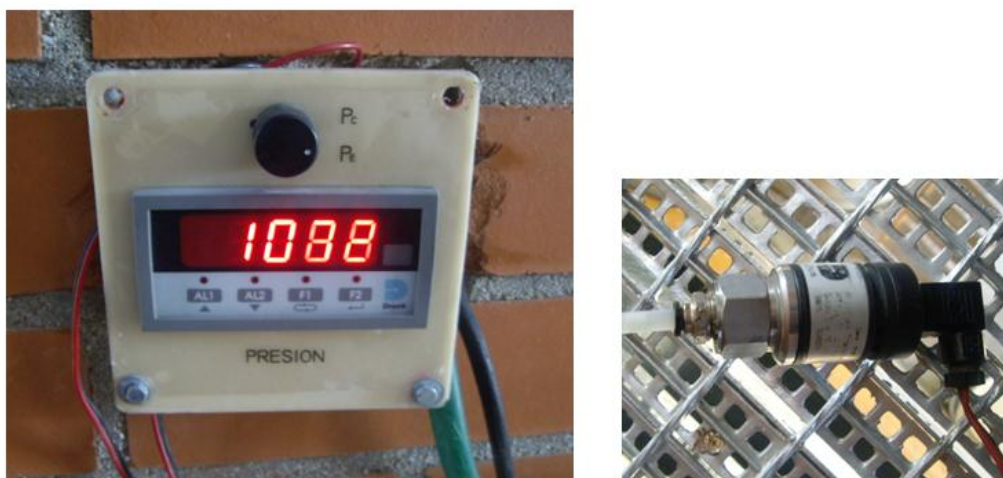


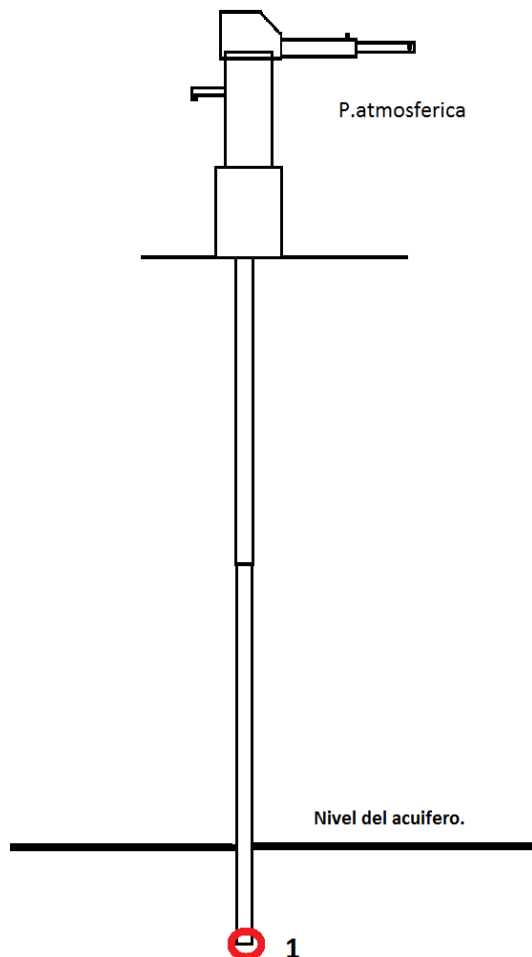
Figura 33: Sensor de medición de la presión.

4.2.2 Simulación

Para una completa y correcta simulación de la altura debemos tener en cuenta dos aspectos que influyen según la altura de bombeo:

- ❖ El peso de la **columna de agua** que tenemos en el interior de la tubería de bombeo produce una sobrepresión en el fondo de la tubería. El agua descansa sobre el pistón móvil ejerciendo una fuerza vertical de sentido negativo que nos provoca que el esfuerzo de la persona que está sacando agua se incremente según aumenta la altura de la columna de agua.

Para el cálculo de la presión de simulación en función de la altura elegida, utilizaremos la hidrostática:



La presión en el punto 1, será la suma de la presión atmosférica más la presión de toda la columna de agua:

$$P_1 = P_a + \rho \cdot g \cdot h$$

Dónde:

$$P_a = 0,909 \text{ bar}$$

$$\rho = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Figura 34: Esquema de la instalación de bombeo.

Por lo que nos quedaría despejar “h” por la altura elegida:

Altura(m)	Presión(bar)
10	1,889
15	2,379
20	2,869
25	3,359
30	3,849
35	4,339
40	4,829

Tabla 10: Presión en la parte superior del pistón móvil para una altura dada.

- ❖ El **peso del eje** que se distribuye a lo largo de la tubería de bombeo, que depende de la altura elegida, por lo que tendremos que el peso del eje será igual a:

$$P_{eje} = \left(\frac{\pi \cdot d_{eje}^2}{4} \right) \cdot h \cdot \rho_{acero}$$

$$\rho_{acero} = 7800 \frac{Kg}{m^3}$$

$$d_{eje} = 0,012 m$$

En la siguiente tabla se resumen los valores del peso del eje en función de la altura del pozo.

H (m)	P.eje (kg)
10	9
15	13,5
20	18
25	22,5
30	27
35	31,5
40	36

Tabla 11: Peso del eje según la altura.

Pero el sistema de simulación del peso del eje no interviene el sistema de presión antes citado, en este caso el mecanismo consiste en un sistema de polea con una cierta carga equivalente al peso del eje, pero situada en otro punto diferente en el brazo de la bomba.

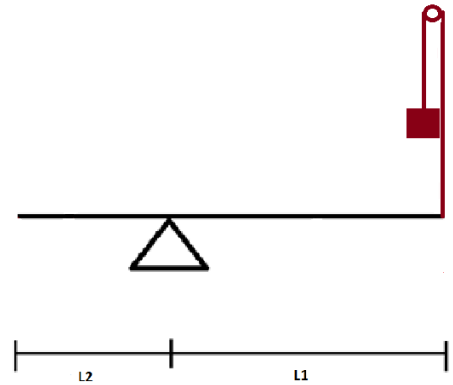
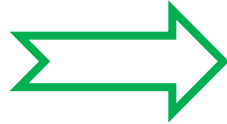


Figura 35: Sistema de simulación del peso del eje mediante una polea:



Figura 36: Polea.

Para calcular la fuerza equivalente en un punto determinado del brazo, el cual está situado en los mangos del brazo, ya que su situación nos facilitara los cálculos en estudios posteriores, debemos realizar un equilibrio de momentos en el anclaje brazo-bomba, ya que es el único punto fijo (sin movimiento), con lo que para que este en equilibrio el sumatorio de momentos a cada lado del punto fijo debe ser igual y de mismo sentido. En el brazo se sitúan la fuerza del eje en su posición fija y una fuerza equivalente en los mangos del brazo, ambas verticales y de sentido contrario.

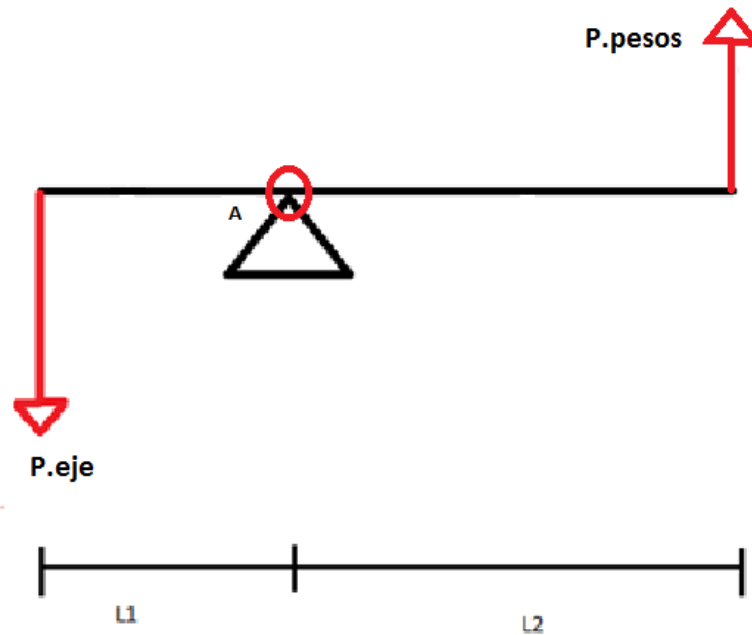


Figura 37: Esquema simulación peso del eje.

Con lo que:

$$P_{\text{eje}} \cdot L_1 = P_{\text{pesos}} \cdot L_2$$

$$P_{\text{pesos}} = \frac{P_{\text{eje}} \cdot L_1}{L_2}$$

Con lo que el peso de simulación queda en función del peso del eje que, está en función de la altura, y de las distancias de los dos extremos del brazo. Sabiendo que el brazo no solo tiene una posición, sino que disponemos de 7 posiciones diferentes, para facilitar el bombeo.

Esta aplicación se lleva a cabo gracias a que el brazo consta de dos tramos de acero circulares y huecos, uno de ellos introducido en el otro y con diferentes orificios para que mediante con un tornillo roscado podamos fijar la posición adecuada.



Figura 38: Fijación de la posición del brazo.

Por lo que para cada posición:

Posición	L1	L2
1	1,125	0,187
2	1,05	0,187
3	0,97	0,187
4	0,89	0,187
5	0,81	0,187
6	0,725	0,187
7	0,65	0,187

Tabla 12: dimensiones técnicas del brazo en función de la posición de este.

Como se puede observar en la tabla, la posición 1 correspondería a la posición más alejada y la 7 a la más cercana.

Volviendo a la ecuación anterior, el peso de simulación quedaría en función de la posición del brazo y la altura de bombeo. Más adelante entraremos en detalle en la aplicación para diferentes alturas.

$$P_{pesos} = \frac{P_{ej} \cdot L_1}{L_2}$$

Comprendidos estos dos puntos de nuestra simulación, y siguiendo con las características de la instalación del laboratorio, debemos saber que para que esto se realice debemos impedir que el agua ascienda por la tubería principal de bombeo y circule por el sistema de presión, a la vez que permitamos el movimiento del eje, por lo que colocamos un collarín justo después de la primera desviación al sistema de presión, el cual impedirá que el agua presurizada por debajo del collarín pase a la zona superior de este, y la presión de bombeo permanezca constante, además de permitir el correcto funcionamiento del eje, produciendo en él un pequeño rozamiento que habrá que tenerlo en cuenta en siguientes cálculos.



Figura 39: Collarín.

En apartados posteriores entraremos más en detalle de su correspondiente función, diseño y alojamiento de este sistema.

4.2.2.1 Regulación del Sensor de presión

Otro apartado importante en asegurarnos de la correcta simulación de la altura, es calibrar el sensor de presión que utilizaremos para nuestras mediciones, para ello nos ayudaremos de otro sensor de presión más ajustado, y mediante una serie de muestras de medición con ambos aparatos en la misma situación, intentaremos ajustar un posible error del sensor de medida, sabiendo que nuestro sensor de medición tiene un límite de 2,5 bares absolutos.

La primera muestra corresponde a la medición de la presión del ambiente, por lo que para cada sensor obtenemos un resultado diferente. Este primer valor lo consideramos el origen o “punto 0”, y por lo que se puede ver en los resultados, sabemos que el sensor utilizado en nuestra instalación nos medirá la presión atmosférica.

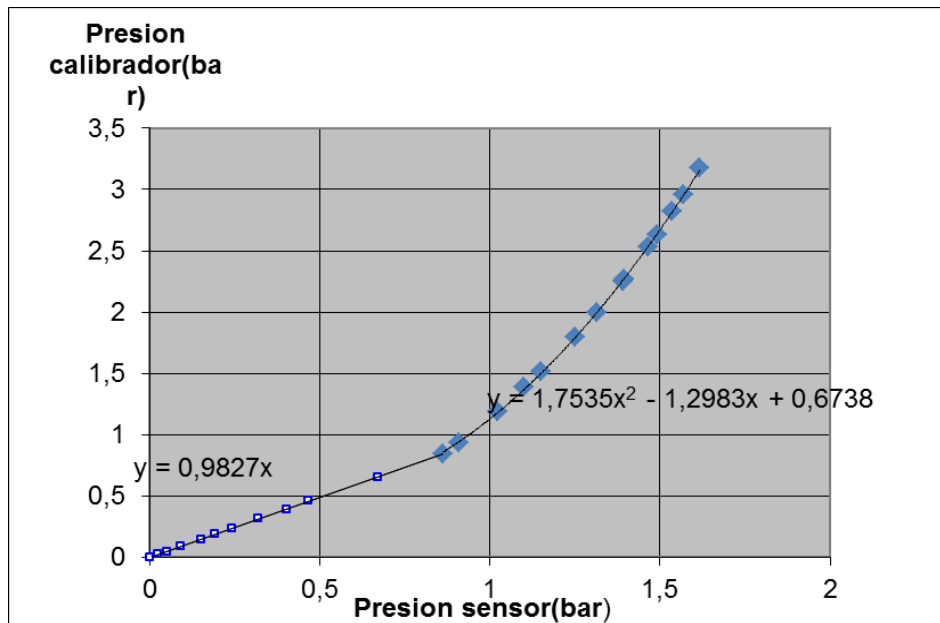
Puntos iniciales:

sensor	calibrador
0,909	-0,012

Por lo que si consideramos estos puntos nuestros orígenes del ensayo:

Sensor	Calibrador
0	0
0,024	0,027
0,051	0,048
0,09	0,092
0,151	0,144
0,19	0,192
0,243	0,235
0,32	0,32
0,403	0,394
0,466	0,466
0,671	0,653
0,863	0,848
0,909	0,939
1,024	1,186
1,1	1,387
1,149	1,515
1,251	1,793
1,315	1,994
1,391	2,248
1,395	2,266
1,466	2,53
1,493	2,632
1,537	2,822
1,569	2,955
1,617	3,179

Tabla 13: Valores de las presiones de ambos útiles.



Grafica 1: Rectas de equilibrio del sensor de presión.

De la gráfica podemos observar que a partir de unos 1,8 bares absolutos, el sensor de presión, se desvía bastante del valor real de la presión medida con el calibrador. Por eso hemos conseguido las rectas de aproximación, que utilizaremos para obtener nuestros valores reales de la presión, sustituyendo la “x” por la presión a la que queremos llegar.

Sabiendo la presión que tenemos que elegir según el calibrado de nuestro sensor, nos falta por saber cuál será la presión que deberemos elegir para una altura dada.

Debido a la ubicación del sensor de medida en nuestra instalación.

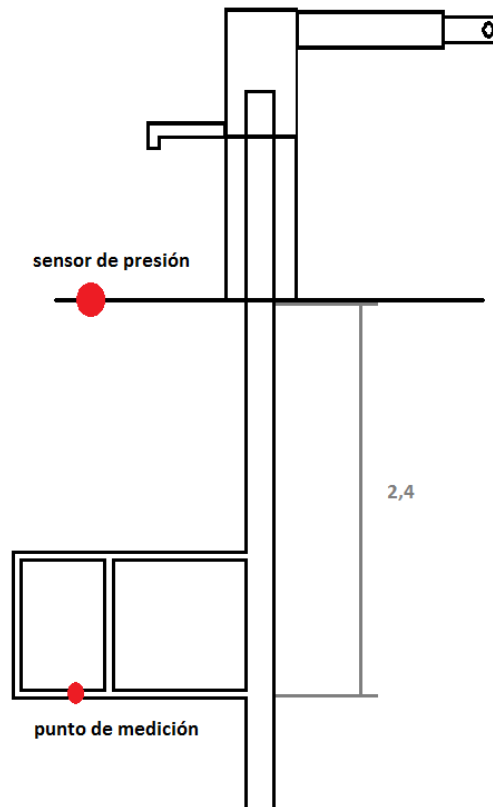


Figura 40: Esquema de la instalación del laboratorio, cotas en metros.

Tenemos que para una medición de la presión:

$$P_{medida} = P_a + \rho \cdot g \cdot h$$

Pero a esa presión de medida tendríamos que restarle la presión debida a la diferencia de alturas entre el punto de medición y el sensor de medida, esos 2,4 metros nos darían una presión:

$$P_{diferencia} = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,8 \cdot 2,4 = 0,2352 \text{ bar}$$

Por lo que para las distintas alturas de bombeo tendremos una presión real diferente:

Altura(m)	Presión(bar)	Presión real(bar)
10	1,889	1,6538
15	2,379	2,1438
20	2,869	2,6338
25	3,359	3,1238
30	3,849	3,6138
35	4,339	4,1038
40	4,829	4,5938

Tabla 14: Valores medidos y reales de la presión, en bares.

Por lo que los valores de la presión real serían los que tendríamos que sustituir en nuestras rectas de calibración, antes definidas.

4.2.2.2 Estanqueidad del sistema de presión

Sabiendo cual será la presión calibrada a la que tenemos que llegar para la correcta simulación de la altura, lo último será asegurarnos de la correcta estanqueidad de la zona de líquido presurizada (zona 1 del esquema).

Sobre este término, hemos tenido bastantes problemas en nuestra instalación, ya que durante el bombeo la presión en el interior de la zona presurizada, además de no permanecer constante (caso ideal) variaba con rangos que indicaban una posible avería interna.

Por lo que tuvimos que revisar todos sus componentes, hasta dar con el problema, que se trataba de una avería en el collarín. La posición inicial de este nos dificultaba mucho su mantenimiento, por lo que además de cambiarlo elegimos colocarlo, como veremos a continuación, en una posición en la que el mantenimiento de la pieza fuese lo más sencillo posible.

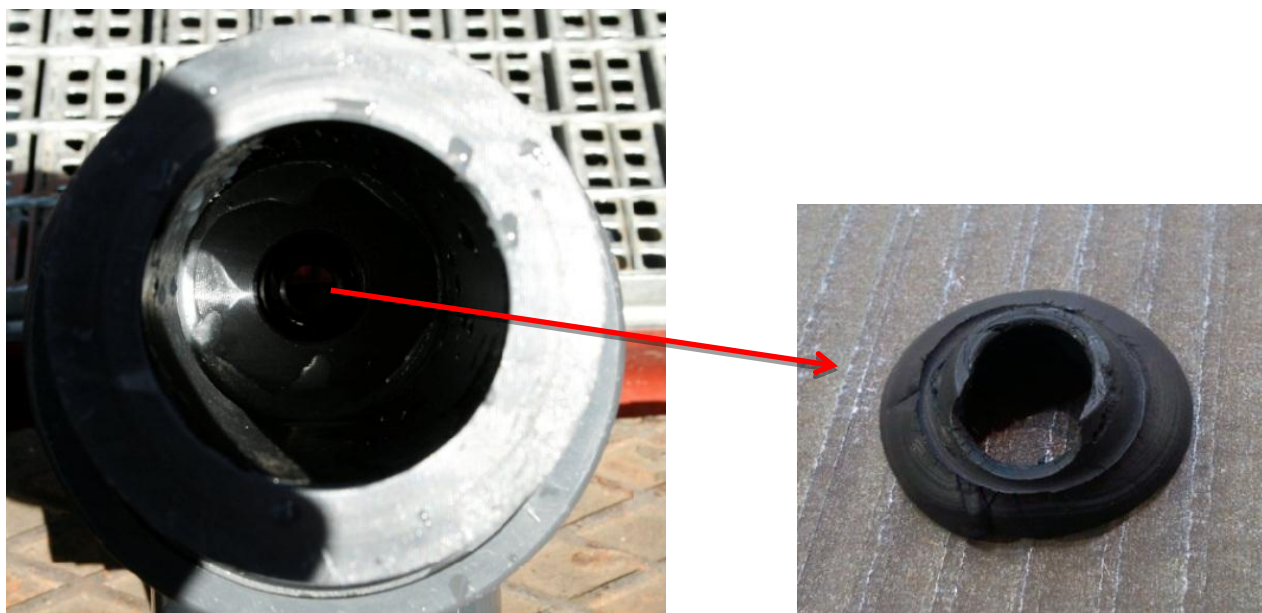


Figura 41: Sistema de sellado inicial.

Esta avería suele ser normal en estos mecanismos, ya que probablemente el retén se rompió durante uno de tantos montajes de la instalación al introducir el eje de

bombeo. Por lo que se aconseja efectuar un pequeño chaflán en el extremo superior del eje para facilitar su paso por el retén.

Para la sustitución de la pieza inicial, elegimos un collarín, que permite la estanqueidad de un fluido de hasta seis bares, además de permitir el correcto movimiento traslacional del eje de bombeo. Este mecanismo consta de sus siguientes dimensiones:

- $d = 12\text{ mm.}$
- $D = 22\text{ mm.}$
- $h = 8\text{ mm.}$



Figura 42: Collarín.

Teniendo en cuenta su posterior mantenimiento hemos decidido sacarlo de la propia tubería y colocarlo en la unión superior del tramo de tubería que lo contenía. Para lo que necesitamos una pieza auxiliar de colocación.

Esta citada pieza debe situar el collarín en una posición centrada y permitir que el propio collarín no tenga movimiento. En las siguiente imágenes podemos observar la posición inicial (rojo) y la elegida (amarillo) del sistema de sellado.

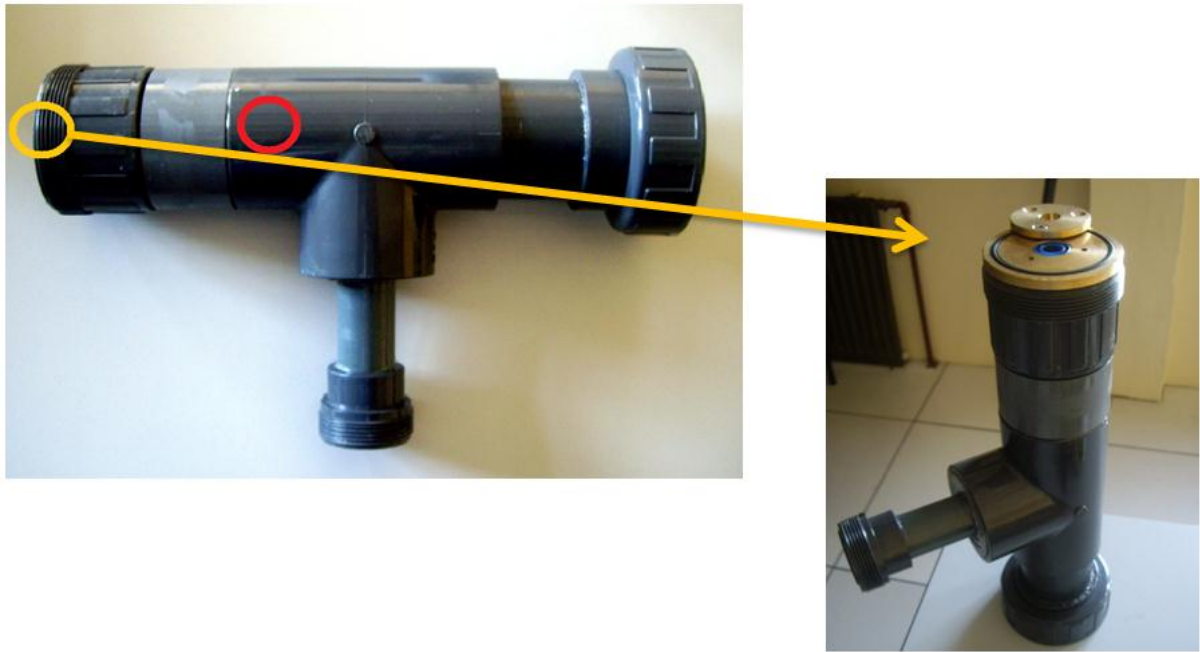


Figura 43: Posición inicial y final del collarín.

La pieza de sujeción del collarín es de latón, elegido por su mejor comportamiento con el material del collarín, además de darnos más opción de montaje, este mecanismo consta de dos piezas:

- Pieza de colocación: es una sencilla pieza que encaja en la tubería de bombeo, y nos permite la colocación centrada del collarín. Esta pieza cuenta con una junta tórica que nos permita el correcto cierre del sistema de tuberías. A continuación se muestran sus dimensiones técnicas:

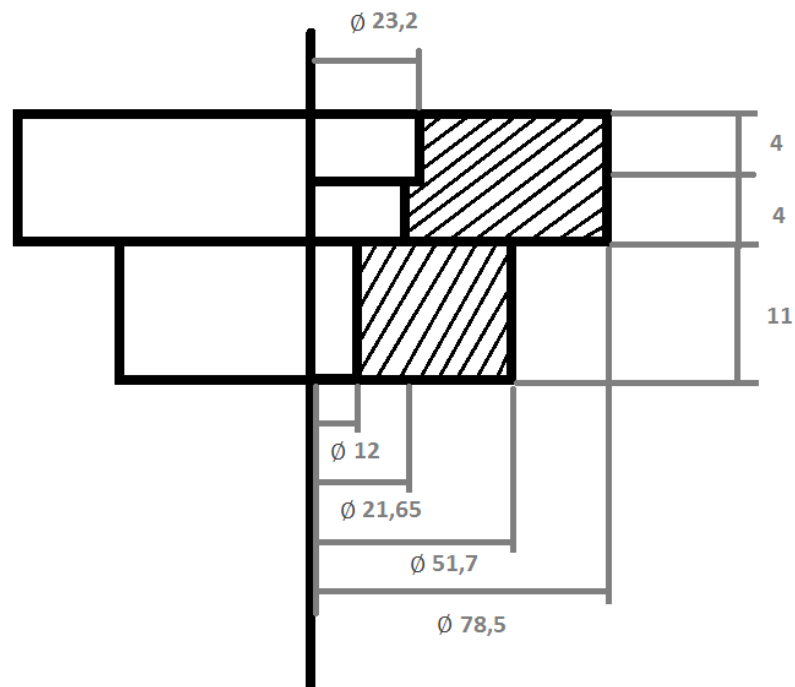


Figura 44: Dimensiones técnicas de la pieza de acoplamiento del collarín.

- Pieza de sujeción: se trata de un anillo de diámetro entre ambos valores de los diámetros del collarín, para permitir su sujeción, unido a la pieza de colocación mediante tres tornillos.

En la siguiente imagen podemos observar todo el conjunto y sus características de montaje.

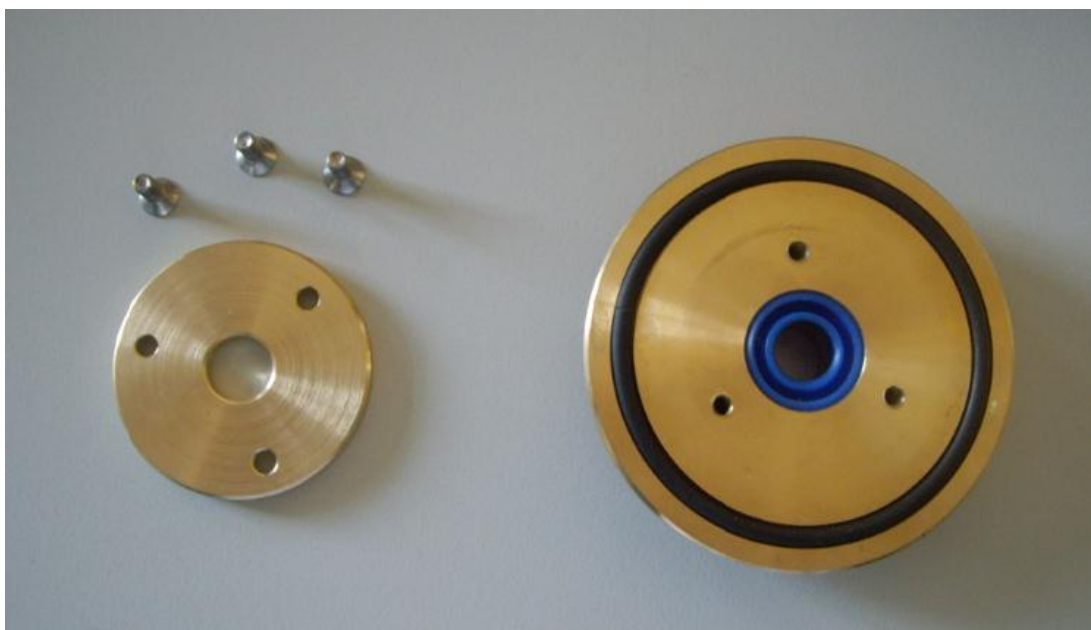


Figura 45: Conjunto de acoplamiento del collarín.

Este mecanismo de sujeción está pensado por si en el caso de una avería en el collarín, con solo desatornillar nuestro anillo de sujeción podamos retirar la pieza dañada y colocar la nueva pieza en unos minutos.

Basándonos en los resultados del estudio final podemos certificar que la elección de este tipo de sistema ha mejorado el correcto comportamiento de nuestro sistema de simulación.

4.3. Mantenimiento de la instalación del laboratorio.

Como sabemos nuestra instalación de estudio difiere en algunos matices de la instalación de una bomba a pie de campo, aunque el sistema de presión no nos supondría un problema serio en el mantenimiento de la bomba, el collarín antes citado nos obliga a dividir en dos partes el desmontaje y montaje del sistema. Bien operemos en la parte superior del sistema (a nivel del terreno) o en la inferior, para la que operaremos desde la planta baja del laboratorio. Teniendo esquematizada nuestra instalación procederemos al desmontaje de la bomba como parte principal del mantenimiento.

4.3.1 Desmontaje:

Inicialmente tenemos que operar en la parte superior de la instalación. Nuestro objetivo será liberar el eje del brazo, para el posterior desmontaje del pistón, ya en la parte inferior de la instalación.



Figura 46: Bomba Afridev del laboratorio.

Para ello comenzaremos desenganchando el brazo de la bomba, que vemos en la imagen de anterior, del sistema de sujeción del eje. Lo podemos observar en la siguiente secuencia de imágenes.



Figura 47: Secuencia de desacople del brazo con el cuerpo de la bomba.

Como podemos ver, primero tenemos que desacoplar el brazo del cuerpo de la bomba a la vez que lo desencajamos de la pieza de sujeción eje-bomba, la cual la observamos en la imagen inferior.

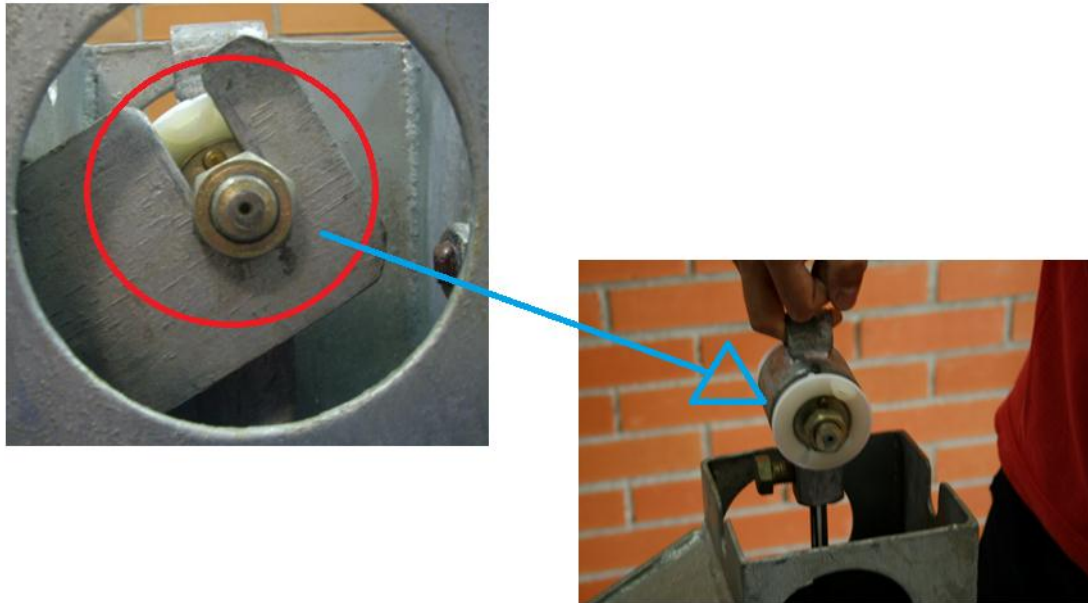


Figura 48: Anclaje brazo-eje, y pieza de sujeción de la pieza.

Lo unico que nos queda ahora, seria liberar el eje de la pieza de sujeción, en este instante la barra bajaría hasta la posicion más inferior posible.

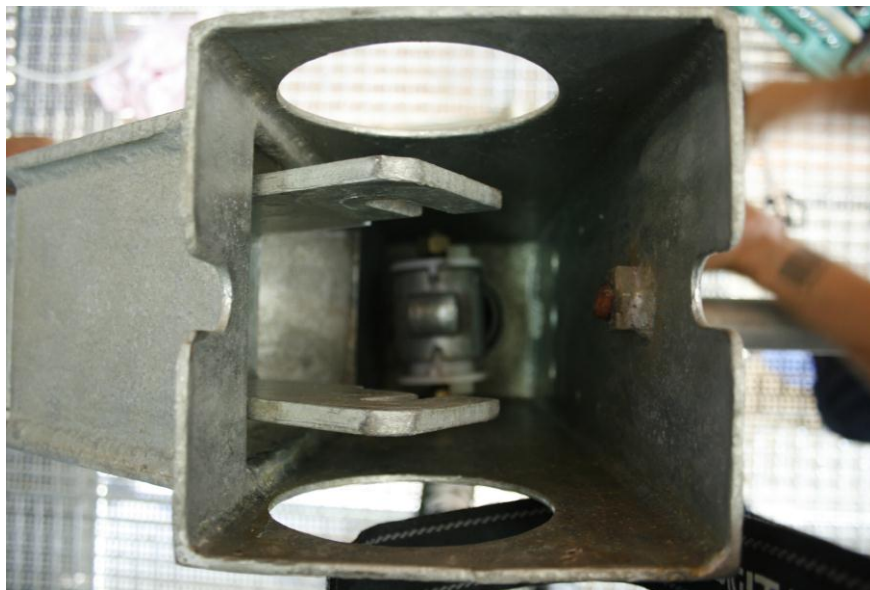


Figura 49: Liberación del eje.

Liberada la barra de la sujeción, proseguimos desmontando el cuerpo de la bomba, es un desmontaje sencillo con 4 puntos de sujeción (4 tornillos). Al tener desacoplada la carcasa podemos observar como la tubería principal se encaja con la carcasa mediante un acople de caucho, que nos sirve de sujeción del primer tramo de la tubería principal. Esta parte se puede observar en las imágenes inferiores.



Figura 50: Desacople del cuerpo de la bomba.

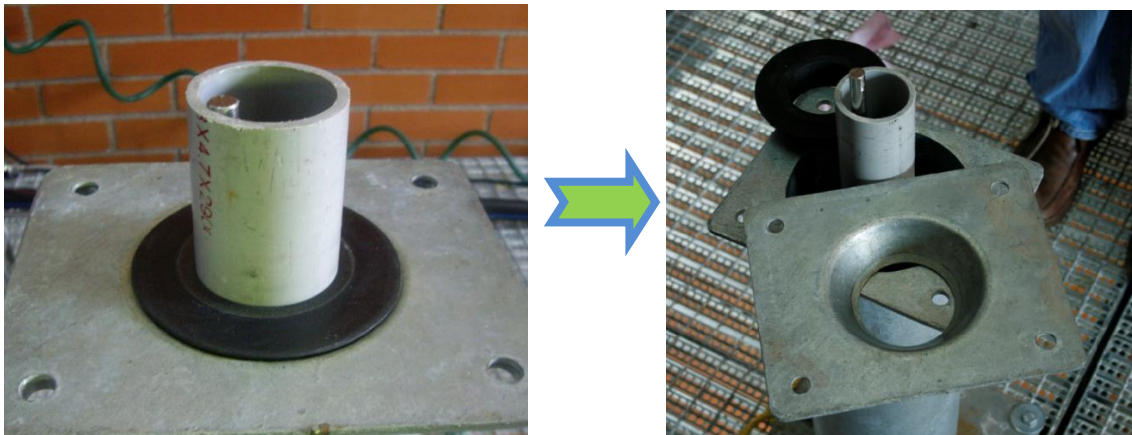


Figura 51: Juntas de sujeción de la tubería de bombeo.

Con esta parte termina el desmontaje correspondiente a la parte superior de la instalación, con lo que nos trasladaremos al sistema inferior.

Trasladandonos a la parte inferior del sistema, lo primero que tenemos que separar sería todo el sistema de presión, que utilizamos para modelar los ensayos de altura. Este sistema consta de un circuito sencillo de tuberías con una llave de paso que permite cuando queramos que el agua discorra a través de una válvula de presión, la cual se encarga de establecer la presión adecuada para la altura que estemos ensayando. Este sistema de tuberías está conectado a la tubería principal por dos puntos, uno antes del citado collarín, y el otro después de este.



Figura 52: Sistema de presión y situación del collarín.

Como se puede observar en la imagen, el tramo de tubería con diámetro más grande corresponde a la tubería principal (por donde transcurre el eje), y en el punto superior de este tramo de tubería de bombeo, se encontraría nuestro collarín que nos permita la correcta simulación.



Figura 53: Posición del collarín.

Tras haber quitado el sistema de presión, el siguiente paso será desmontar todo el sistema de la tubería de bombeo, para ello antes de nada tendremos que separar los dos tramos del eje para poder extraer la tubería principal, ya que la unión entre ambas partes del eje no puede pasar por el collarín, al tener un diámetro mayor. Para realizarlo, desmontamos la parte superior de la tubería y la elevamos hasta poder llegar a la unión entre las barras.

Antes de haber separado los dos tramos de eje, desde la parte superior del laboratorio podemos unir los dos pistones, mediante su unión roscada, habiendo realizado este paso antes nos ahorraremos sacar el último tramo de tubería, ya que ya tendremos la válvula de pie fija unida al pistón móvil.

Teniendo cuidado al separar los dos tramos, para que el tramo de la barra que contiene ambos pistones no caiga hasta el fondo de la tubería, sacamos los dos tramos de la tubería principal así como ambos de pistones. Este procedimiento debe ser con cuidado para no provocar cualquier sobreesfuerzo en el collarín.



Figura 54: Extracción de ambos pistones.

Entonces podemos despiezar los distintos tramos de la tubería de bombeo, así como hacernos con el pistón fijo que se encuentra anclado en el último tramo de la tubería. En las imágenes inferiores podemos observar los distintos tramos de tubería y los pistones.

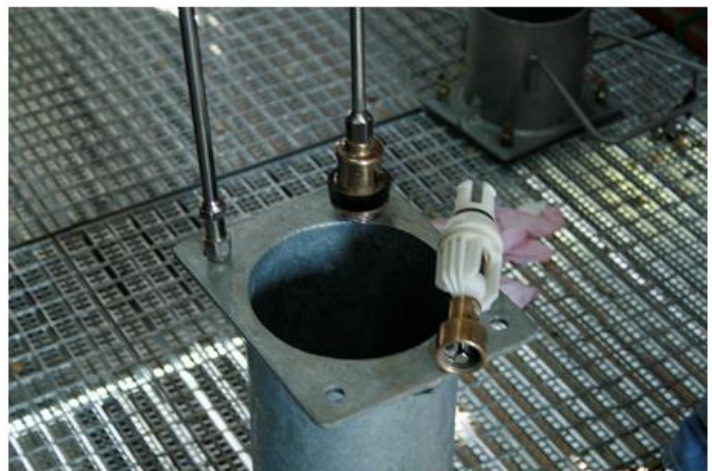


Figura 55: Tramos de la tubería de bombeo y ambos pistones.

Con este último paso concluiríamos el desmontaje completo de nuestra instalación. Por lo que subsanada una posible avería procederíamos a su correcto montaje.



Figura 56: Despiece de las principales piezas de la instalación.

4.3.2Montaje:

Habiendo entendido correctamente el desmontaje de la instalación, el montaje nos resultará muy sencillo, eso sí, el orden será el inverso, por lo que comenzaremos por la parte inferior de la instalación. Lo primero sería colocar el último tramo de la tubería principal, habiendo colocado antes el pistón fijo.



Figura 57: Último tramo de la tubería de bombeo.

Para el montaje de la tubería principal tendremos que tener en cuenta la correcta perpendicularidad del sistema, para evitar una posible deformación del eje, lo que nos provocaría un deterioro del collarín, y así nuestro sistema de presión no funcionaría correctamente, ya que el agua presurizada perdería parte de su sobrepresión por las pérdidas en el collarín. Debido a ello tenemos diferentes anclajes para el sistema de tuberías.

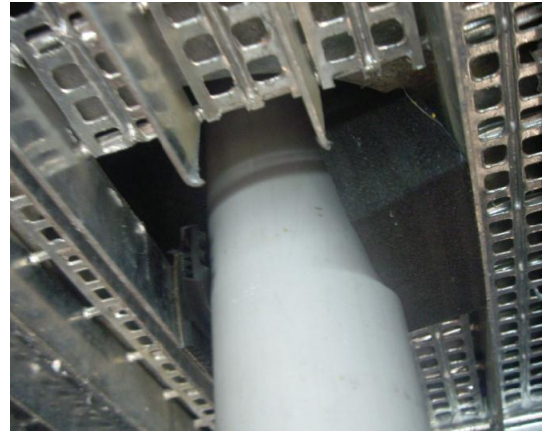
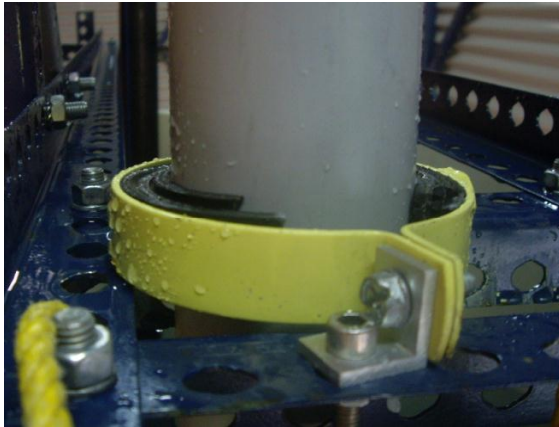


Figura 58: Anclajes de la tubería de bombeo.

Estos mecanismos nos ayudan a la correcta posición de la tubería de bombeo, así como a la posición del eje, los cuales se encuentran, uno a nivel del terreno (primera planta del laboratorio), y el otro unos centímetros por encima del nivel del agua.

Además nos ayudamos de un tramo de cuerda para evitar movimientos innecesarios producidos por las vibraciones durante el proceso de bombeo en el tramo de tubería que se encuentra en el interior del depósito. Esta cuerda sujeta el tramo final de la tubería de bombeo, la cual la anclamos a la estructura auxiliar de la instalación fija en el depósito.

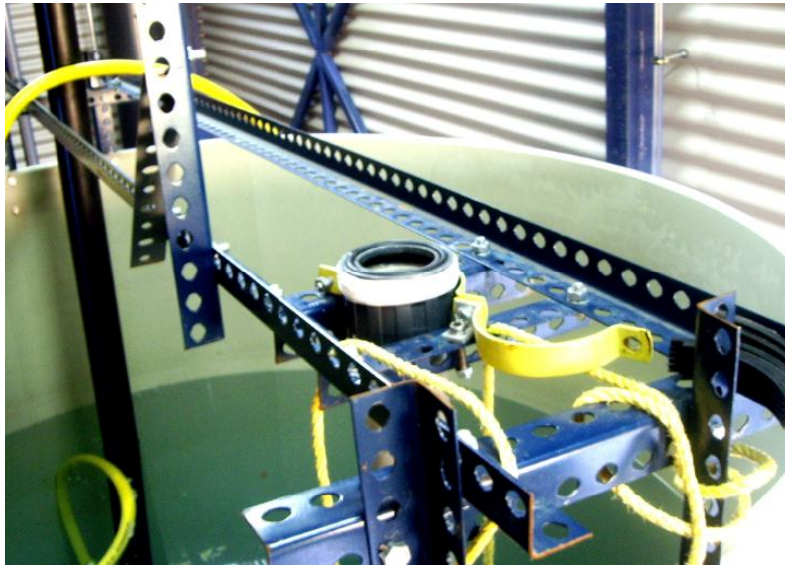


Figura 59: Estructura auxiliar de apoyo a la instalación

Habiendo fijado correctamente el último tramo de la tubería, proseguiremos colocando el primer tramo de ésta y la parte intermedia del sistema de tuberías (donde se conecta el sistema de presión), de momento este tramo se quedara suelto, para a continuación, introducir los dos tramos del eje.

Para introducir el tramo superior del eje debemos tener mucho cuidado, ya que podemos dañar el collarín, por eso realizamos un pequeño chaflán en el extremo superior del eje que nos facilite la introducción del eje en el citado collarín. Una vez introducidos los dos tramos del eje y unidos correctamente podremos conectar entre si los diferentes tramos de la tubería principal de bombeo. Esta operación se tiene que realizar de esta manera debido a que por el collarín no podemos introducir la sección de la unión entre ambos tramos ya que posee un diámetro mayor al del eje.

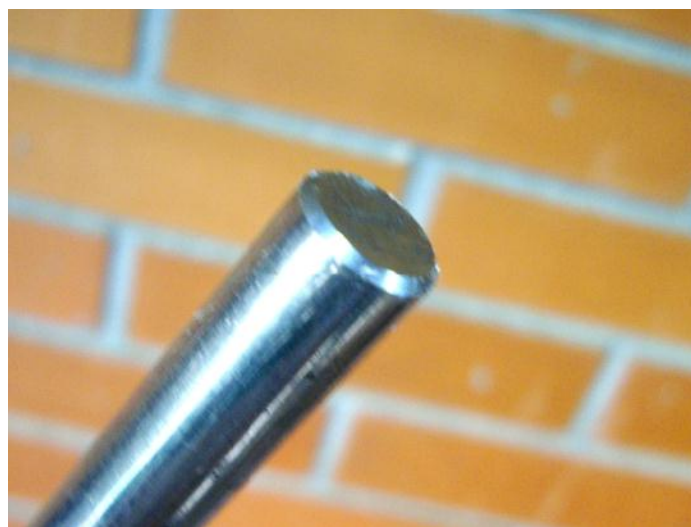


Figura 60: Chaflán en el extremo superior del eje.

Una vez tengamos nuestro sistema de tuberías principal correctamente unido y anclado a las diferentes estructuras auxiliares que tenemos a su alrededor, lo ultimo del montaje en la parte inferior será conectar el sistema de presión a la tubería principal. De este modo podemos trasladarnos a montaje en la parte superior de la instalación.



Figura 61: Parte inferior de nuestra instalación.

Comenzaremos por colocar el cuerpo de la bomba, habiendo comprobado que el eje se encuentra en su posición correcta, tras montar el cuerpo de la Afridev nos centraremos en unir el eje con el sistema de sujeción. Asegurándonos de la correcta unión entre las 2 partes proseguiremos por conectar la pieza de sujeción del eje con el brazo, al tener el brazo conectado correctamente tanto con el eje como con la carcasa, ya tenemos la instalación lista para hacer un ensayo de su funcionamiento.

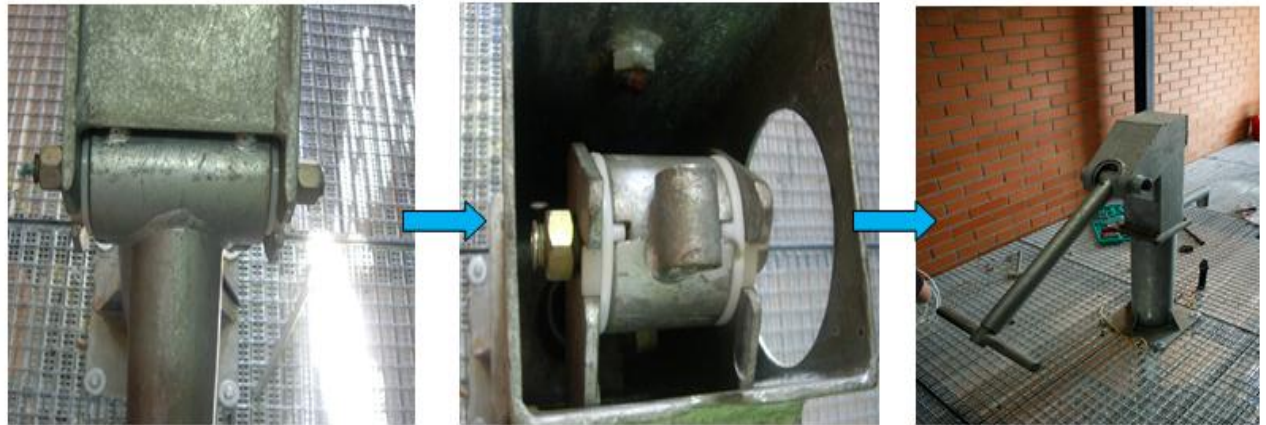


Figura 62: Acoplamiento del brazo en el cuerpo de la bomba.

Aquí termina la detallada descripción de la instalación de nuestro proyecto. Por lo que en apartados posteriores nos centraremos en el estudio de su comportamiento en diferentes aspectos.

5. Resultados:

5.1 Sistema de presión

5.1.1 Caracterización del sistema de presión

Para la correcta simulación de la altura en nuestro sistema, debemos entender el mecanismo además de cerciorarnos del correcto funcionamiento de nuestro sistema de presión, desgranando cada parte de él.

Comprendiendo más a fondo lo que realmente está ocurriendo en el interior del sistema de presión, sabemos que el agua es un líquido incomprensible, y estará presurizado en la parte superior del pistón móvil, al otro lado del pistón el agua se encuentra a una presión menor. Por lo que debe existir una perfecta estanquidad en el conjunto de presión.

Si nos encontramos en la situación inicial de la imagen siguiente, el pistón móvil estaría en su punto muerto superior (PMS), con el brazo en la posición inferior en la palanca de bombeo. El agua a ambas partes del pistón estará en condiciones diferentes de presión, y con unos volúmenes muy dispares, ya que la carrera máxima del pistón es 225 mm y la altura puede llegar hasta 40 metros. Por lo que en el momento en que el usuario decida comenzar a subir el brazo, las presiones en la situación 2 a ambos lados del pistón deben igualarse, antes habiendo superado la presión del volumen de la parte 2("V2") a la del volumen de la parte 1("V1"), para que la válvula de pie colocada en el pistón móvil deje pasar el volumen de agua entre ambos pistones a la parte superior del pistón móvil.

En este proceso de elevación del tramo de agua, situado entre ambos pistones, la variación de presión debería ser prácticamente constante, por lo que en nuestra simulación debemos valorar la opción de un pulmón, que absorba esa posible bajada de la presión. Por lo que antes de nada, debemos decidir si será necesaria la colocación del citado mecanismo.

Para realizar el estudio en nuestra instalación, nos ayudaremos del siguiente esquema.

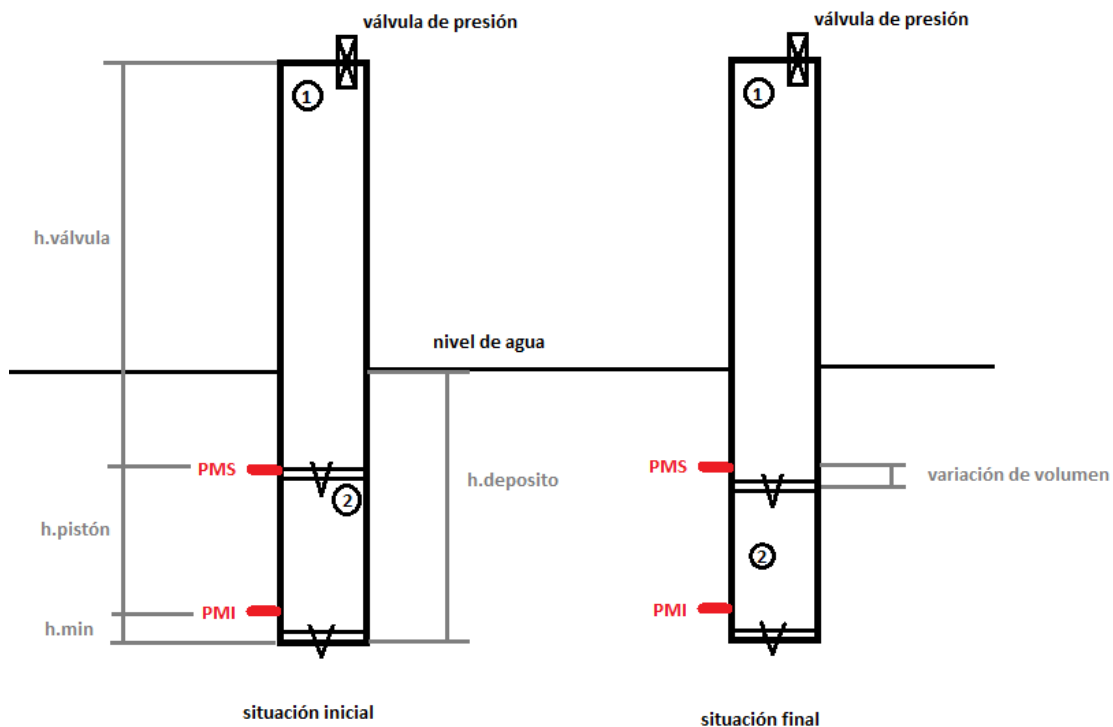


Figura 63: Esquema del proceso de bajada del pistón.

De donde podemos observar dos situaciones temporalmente diferentes, inicial y final, y dos partes de estudio, como son la “parte 1” y la “parte 2”, que corresponden a los volúmenes de agua a ambas partes del pistón fijo.

Además del esquema anterior sabemos:

- **h.min:** corresponde a la longitud mínima que debe haber entre el punto muerto inferior del pistón móvil y la válvula de pie fija, esta distancia debe ser igual a la longitud de eje que introducimos en la pieza de anclaje eje-brazo, y es igual a 4 milímetros.
- **h.pistón:** es la carrera máxima del pistón móvil, 225 milímetros.
- **h.válvula:** es la distancia que hay entre el punto muerto superior y la válvula de presión, es igual a 1,36 metros.
- **h.depósito:** corresponde a la distancia entre el nivel de agua en el depósito y la entrada de la válvula de pie fija, y equivale a 0,55 metros, esta altura del agua con respecto a la válvula fija nos servirá para el cálculo de la presión 2 en la situación inicial.
- **Variación de volumen:** corresponde a la variación del volumen tanto en la parte 1 como en la 2, debido al paso de la posición inicial a la final.

Para que desestimemos la opción de colocar un pulmón en nuestra instalación, que nos permita absorber la variación de la presión, el líquido en cada parte debe comportarse siguiendo las siguientes ecuaciones. Además al ser un líquido incomprensible los valores de “n” tienen que tender a infinito.

$$P_1 \cdot V_1^n = P_{F1} \cdot V_{F1}^n$$

$$P_2 \cdot V_2^n = P_{F2} \cdot V_{F2}^n$$

También sabemos:

$$V_1 + V_2 = V_{F1} + V_{F2}$$

$$P_{F1} = P_{F2} = P_F$$

Con lo que tenemos tres ecuaciones con cuatro incógnitas, “ P_F ”, “ V_{F2} ”, “ V_{F1} ” y “n”, pero P_F será conocida en el siguiente ensayo.

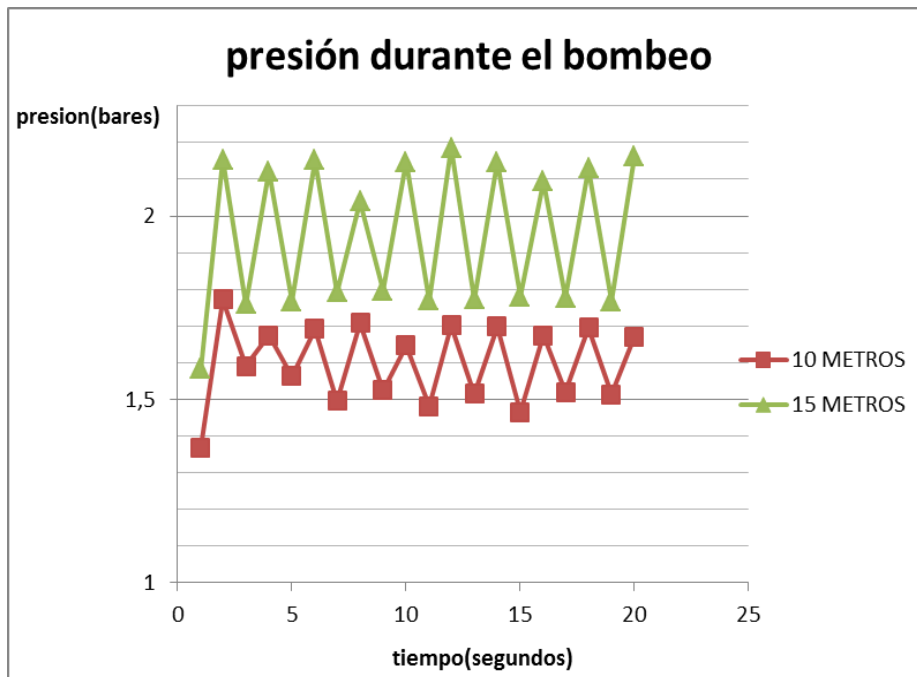
El ensayo consiste en medir la presión durante la acción de bombeo, diferenciando entre el punto superior e inferior del pistón, con una duración de 20 segundos, y una frecuencia del movimiento del brazo de $f = 1\text{Hz}$, por lo que cada segundo el pistón cambiara de punto muerto. Tras ello esperaremos 10 segundos con la bomba parada, y posteriormente controlaremos la presión cada cinco minutos.

En la siguiente tabla observamos los valores de la presión en la parte 1 del esquema de la figura 1, los segundos impares corresponden al PMI del pistón móvil.

Tiempo(s)	10 Metros	15 Metros
1	1,368	1,582
2	1,773	2,154
3	1,591	1,76
4	1,675	2,121
5	1,563	1,768
6	1,692	2,153
7	1,495	1,791
8	1,708	2,039
9	1,525	1,796
10	1,647	2,148
11	1,482	1,769
12	1,701	2,186
13	1,515	1,772
14	1,699	2,148
15	1,465	1,781
16	1,674	2,095
17	1,52	1,778
18	1,695	2,129
19	1,514	1,768
20	1,671	2,163

Tabla 15: medidas de la presión en la zona 1 durante 20 segundos de bombeo.

Visualizando la siguiente grafica que representa los valores antes mostrados, debemos saber que el primer punto, correspondiente al primer segundo corresponde a la posición del pistón fijo el PMI, además la frecuencia de movimiento del brazo es un hertzio, por lo que para nuestro estudio las presiones medidas en los segundos pares, que corresponden al PMS, serian nuestra situación inicial en el proceso definido en el esquema 1, y la final corresponde a los segundos impares.



Grafica 2: Representación de las medidas de presión en el PMS y un instante posterior.

Comenzando con la aplicación a nuestra instalación, por la gráfica escogeremos el valor medio de la presión, ya que al inicio del bombeo el sistema es poco estable, de esta forma tomaremos el valor:

$$P_1 = 2,186 \text{ bar}$$

Además podemos calcularnos los volúmenes iniciales de las dos partes:

$$V_1 = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot h + \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot H$$

En esta ecuación anterior nombramos como “h” a la distancia de tubo de diámetro menor (d=25mm) y “H” al tramo de tubería mayor (D= 50mm), ya que la zona 1 de nuestro sistema consta de varios tramos de tuberías dispares. Por lo que:

$$h = 0,65 \text{ m}$$

$$H = 1,675 \text{ m}$$

$$d = 0,025 \text{ m}$$

$$D = 0,05 \text{ m}$$

Con lo que:

$$V_1 = 3,608 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

En el caso de " V_1 " tenemos un tramo de tubería de diámetro mayor de una distancia igual a la suma de la carrera del pistón y la distancia mínima entre ambos pistones, por lo que el volumen será:

$$V_2 = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot (h_{\text{pistón}} + h_{\text{min}}) = 5,007 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Donde:

$$D = 0,05 \text{ m}$$

$$h_{\text{pistón}} = 0,225 \text{ m}$$

$$h_{\text{min}} = 0,03 \text{ m}$$

Sin sernos necesaria la gráfica anterior, podemos calcularnos la presión de la parte 2 en el estado inicial, ya que justo antes de que el pistón llegue al PMS, la válvula de pie fija estará abierta, por lo que la presión en la zona 2 es la misma que la presión en la entrada de la tubería, donde se sitúa el pistón fijo, sabiendo esto y ayudándonos de la fluido estática:

$$P_2 = P_{\text{DEPOSITO}} = P_a + \rho \cdot g \cdot h_{\text{deposito}} = 0,963 \text{ bar}$$

De la ecuación sabemos:

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_a = 0,909 \text{ bar}$$

$$h_{\text{deposito}} = 0,55 \text{ m}$$

Resumiendo todos estos resultados tenemos que:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 2,186 \text{ bar} \\
 P_2 &= 0,963 \text{ bar} \\
 V_1 &= 3,608 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \\
 V_2 &= 5,007 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Nuestro sistema de ecuaciones es:

$$\begin{cases}
 P_1 \cdot V_1^n = P_F \cdot V_{F1}^n \\
 P_2 \cdot V_2^n = P_F \cdot V_{F2}^n \\
 V_1 + V_2 = V_{F1} + V_{F2}
 \end{cases}$$

Estas tres ecuaciones nos permiten obtener la presión y los volúmenes finales a partir de un valor de “n”. Como se ha comentado anteriormente, “n” para líquidos casi incompresibles como el agua debe tener un valor muy alto (la hipótesis de incompresibilidad supondría que “n” tiende a $\pm\infty$). La siguiente tabla muestra los valores de los tres parámetros finales en función de “n” para los dos casos simulados.

Para H = 10m					
Datos de entrada		n	V _{f2} (m ³)	V _{f1} (m ³)	P _f (bar)
P1	1,75 (bar)	0,1	1,45E-06	4,11E-03	1,72746637
P2	0,963 (bar)	1	2,92E-04	3,82E-03	1,65409353
V1	0,003608 (m ³)	10	4,75E-04	3,63E-03	1,63020399
V2	0,0005007 (m ³)	100	4,98E-04	3,61E-03	1,62745146
		1000	5,00E-04	3,61E-03	1,62717232
		10000	5,01E-04	3,61E-03	1,62714437
PF	1,5 (bar)	1E+07	5,01E-04	3,61E-03	1,62714127

Para H = 15m					
Datos de entrada		n	V _{f2} (m ³)	V _{f1} (m ³)	P _f (bar)
P1	2,186 (bar)	0,1	1,57E-07	4,11E-03	2,15778429
P2	0,963 (bar)	1	2,37E-04	3,87E-03	2,03696111
V1	3,61E-03 (m ³)	10	4,66E-04	3,64E-03	1,9851511
V2	5,01E-04 (m ³)	100	4,97E-04	3,61E-03	1,97888124
		1000	5,00E-04	3,61E-03	1,97824239
		10000	5,01E-04	3,61E-03	1,97817839
Pf	1,7 (bar)	1E+07	5,01E-04	3,61E-03	1,97817128

Tabla 16: Parámetros de salida del modelo en función de “n”.

Como se ve en la tabla 16, el modelo anterior predice presiones finales alrededor de 1,63 bares para la simulación a diez metros y de 1,98 bares para la simulación de quince metros. Si lo comparamos con la presión final medida en cada caso, que aparece también en el margen inferior izquierdo de las tablas y que no se utiliza en los cálculos, notamos que la presión final obtenida es en ambos casos es menor que la que da el modelo. Tenemos por tanto que asumir una pequeña fuga en el circuito, que probablemente pueda achacarse al movimiento del eje sobre el collarín.

Los errores de 0,13 bares para H=10m y de 0,28 bares para H = 15m representan desviaciones de aproximadamente 1,3 metros y 2,8 metros en la bajada frente al comportamiento ideal del sello. Aparte, deben considerarse las desviaciones de 0,12 bares para H=10m y de 0,2 bares para H = 15m que son intrínsecas al modelo.

Como conclusión, puede decirse que el sistema funciona razonablemente, simulando adecuadamente la presión en las dos caras del pistón durante la subida, y simulando con un error aceptable las condiciones durante la bajada del pistón. La inclusión de un pulmón u otro sistema disminuiría el error del modelo, pero no las fugas en el sello, por lo que se desestima su inclusión.

5.1.2 Pérdidas del sistema de presión

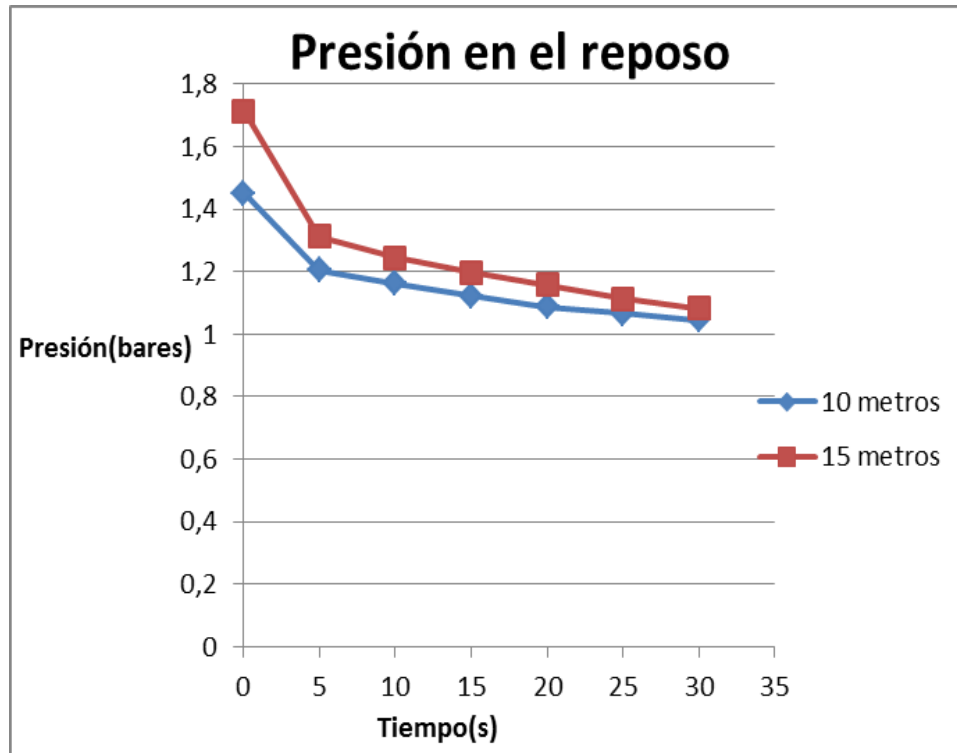
Sabiendo que nuestro sistema de presión se comporta asemejándose al comportamiento ideal, podemos sacar las pérdidas del sistema de presión, estas pérdidas se pueden observar visualmente, en el primer extremo de la tubería, ya que cuando dejamos de bombear agua, el nivel del agua en el interior de la tubería comienza a descender.

Para el cálculo del caudal de pérdidas del sistema de presión, nos basamos en las mediciones de la presión tras el bombeo a una cierta altura, con lo que esperando unos segundos a que el sistema se estabilice haremos una lectura de la presión cada cinco minutos hasta llegar a 30 minutos después del bombeo. En la siguiente tabla podemos observar los datos obtenidos.

Tiempo(minutos)	10 metros	15 metros
0	1,45	1,715
5	1,205	1,312
10	1,162	1,244
15	1,123	1,198
20	1,088	1,158
25	1,067	1,114
30	1,045	1,083

Tabla 17: Valores de la presión en bares durante el reposo de la instalación.

Los valores de la presión en el instante cero representan el nivel máximo del agua en la tubería. En la siguiente grafica podemos ver el desarrollo que sigue la presión de la columna de agua.



Grafica 3: Desarrollo de la presión durante el reposo de la instalación.

Por lo que el primer punto de la medición corresponde al punto en el que el agua está en su punto más superficial, el cual lo observamos en la siguiente figura. Pero aunque el punto de medición de la presión se encuentra en el sistema de presión, el sensor de medición se encuentra al nivel del terreno, según esto y el siguiente grafico podremos calcularnos el caudal de pérdidas del sistema de presión.

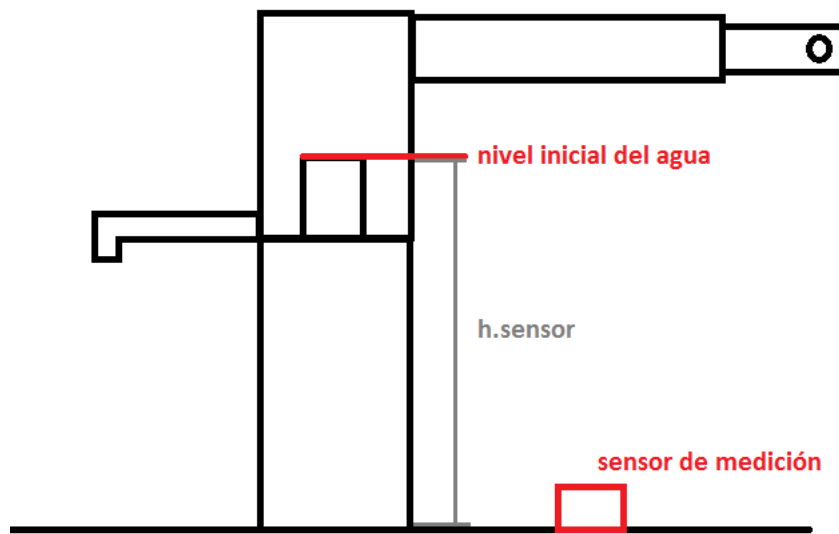


Figura 64: Esquema de la parte superior de la bomba, cotas en centímetros.

Sabemos que:

$$h_{\text{sensor}} = 0,6 \text{ m}$$

Por lo que esta será la cota cero para los puntos iniciales de nuestro estudio, con lo que seguiremos con el cálculo de la altura de bajada de la columna de agua que posteriormente lo expresaremos en el correspondiente caudal de pérdidas.

Para los cálculos emplearemos por ejemplo los valores de una altura de diez metros, con lo que tenemos:

$$\begin{aligned} P_{\text{inicial}} &= 1,45 \text{ bar} \\ P_{5 \text{ minutos}} &= 1,205 \text{ bar} \end{aligned}$$

Sabiendo que para cualquier punto:

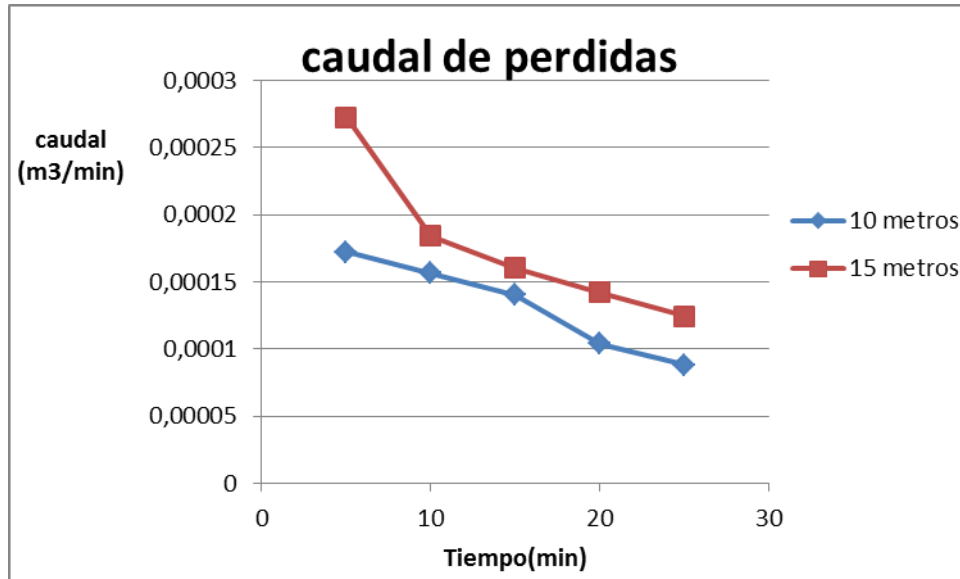
$$P = p_a + \rho \cdot g \cdot h_{\text{agua}}$$

Con lo que para dos puntos de medición consecutivos tenemos que la diferencia de presión nos dará la diferencia de la altura de la columna de agua entre esos dos puntos de medición, separados por un periodo de tiempo establecido, con el que podremos pasar esa diferencia de alturas en caudal de pérdidas

$$P_2 - P_1 = \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

Con lo que conseguiremos la altura que descenderá la columna de agua, para lo que podremos sacar el caudal de pérdidas del sistema de presión de la siguiente forma:

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = \left(D^2 \cdot \frac{\pi}{4}\right) \cdot h_{p\acute{e}rdidas}$$



Grafica 4: Caudal de pérdidas del sistema de presión para diferentes alturas.

Lo que podemos observar, es que cuanto más aumente la altura de simulación, el caudal de pérdidas del sistema de presión disminuye.

5.1.3 pérdidas de la válvula de pie fija

Además, realizamos el mismo estudio para el cálculo del caudal de pérdidas en la válvula de pie fija, por lo que mediante el sistema original, es decir, sin utilizar el sistema de presión, la instalación consta de 3,5 metros de profundidad. De la misma manera el punto inicial se encuentra con la columna de agua en la parte superficial de la tubería de bombeo, en este punto tomaremos el valor de la presión, y mediante las correspondientes mediciones cada cinco minutos podremos calcularlos mediante la variación de la presión el caudal de pérdidas de nuestro pistón fijo.

En la siguiente tabla podemos ver los correspondientes valores del ensayo.

Tiempo(minutos)	Presión(bar)
0	0,965
5	0,957
10	0,944
15	0,932
20	0,913
25	0,904
30	0,895

Tabla 18: Valores de la presión en bares, para una altura de 3,5 metros y sin el sistema de presión.

Por lo que de la misma forma que antes la diferencia de presiones nos dará el valor de la diferencia de alturas entre dos puntos consecutivos, para obtener el caudal de pérdidas de la válvula de pie fija.

$$Q_{pérdidas} = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$$

5.3 Fuerza de bombeo

5.3.1 Caracterización del brazo

Como ya sabemos nuestra bomba Afridev es una bomba manual, con lo que la operación de bombeo se lleva a cabo por el movimiento vertical del brazo de la bomba, gracias al esfuerzo de la persona que se encuentra sacando agua. Este movimiento oscilatorio del brazo desencadena el movimiento vertical del pistón móvil, con una carrera máxima de 225 milímetros.

Por lo que una cuestión importante en este proyecto será el estudio de la fuerza humana necesaria para ejecutar la acción de bombeo a una cierta altura dada.

Pero también debemos saber que los estudios previos de este tipo de bombas identifican a una gran variedad de usuarios, desde gente anciana hasta niños pequeños. En la mayoría de los casos los encargados de la tarea de abastecimiento del agua en el seno de cada familia, suelen ser niños y mujeres. Por lo que el correspondiente estudio de la fuerza de bombeo puede darnos una idea estimada del comportamiento del sistema en diversas situaciones a pie de campo.

Para el nombrado estudio debemos “aislar” el brazo de la bomba, y ver que fuerzas nos actuaran en él, para luego poder despejarnos las fuerzas que necesitamos. A continuación podemos observar el aspecto de nuestra estructura, así como las fuerzas actuantes en él y sus correspondientes cotas de actuación.

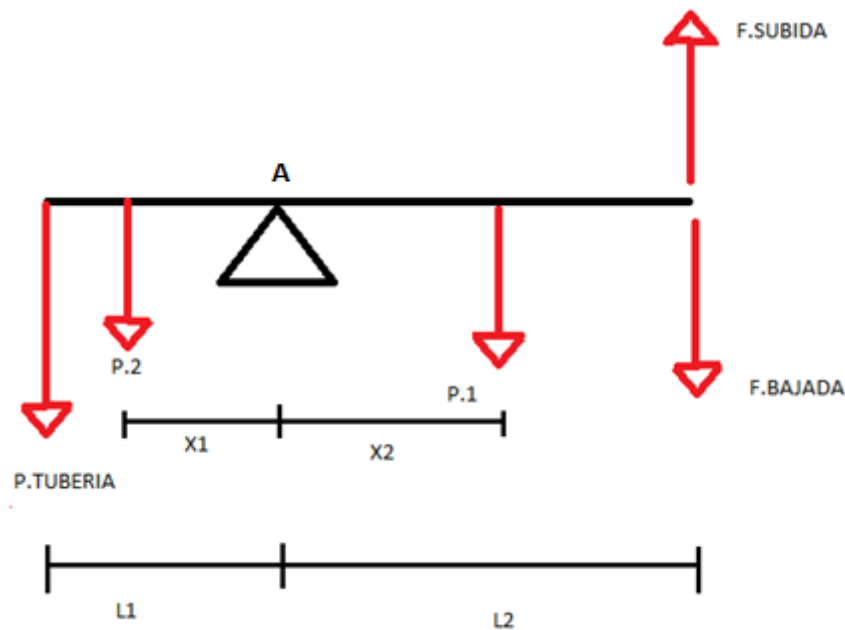


Figura 65: Esquema del brazo de la bomba y las fuerzas aplicadas en él.

Donde identificamos:

- **F.subida:** corresponde a la fuerza de subida del brazo realizada por la persona que está sacando agua.
- **F.bajada:** es la fuerza de bajada del brazo ejecutada por la persona encargada del bombeo.
- **P.tuberia:** equivale al peso total de la tubería, el cual se divide en el peso de la columna de agua y el peso del eje de bombeo.
- **P1:** es el peso de la parte derecha del brazo, es decir, el extremo del brazo en el que realizamos el esfuerzo de bombeo, o extremo libre.
- **P2:** peso de la parte izquierda del brazo o parte anclada al eje.

Además de las fuerzas aplicadas se identifican varias partes que necesitan ser nombradas para el correcto entendimiento del estudio.

Como podemos observar tenemos un punto de apoyo del brazo, el cual llamaremos punto "A", en el que el brazo está anclado al cuerpo de la bomba. En este punto el brazo queda fijo e inmóvil, por lo que será un punto importante en el posterior cálculo de las fuerzas. Además vemos que el brazo queda dividido en 2 partes, una a cada lado del punto "A", por lo que tendremos que dividir el peso total del brazo en dos fuerzas aplicadas ("P1" y "P2") en unas cotas específicas ("X1" y "X2").

- **X1**: distancia del punto fijo “A” al punto donde se aplica la fuerza provocada por el peso de esa parte del brazo, que corresponde al centro de gravedad de la parte libre del brazo. Como veremos a continuación esta distancia variará en función de la posición del brazo.
- **X2**: distancia del punto “A” al centro de gravedad de la parte anclada del brazo, donde se aplica la fuerza provocada por el peso de esa parte del brazo. Al contrario que “X1”, “X2” permanecerá constante.
- **L1**: corresponde a la longitud de la parte libre del brazo, la cual cambiará según la posición del brazo en la que nos encontremos.
- **L2**: longitud de la parte anclada del brazo, que será constante a lo largo de nuestro estudio.

Según las diferentes posiciones del brazo de la bomba, que van desde la posición 1 (más alejada) hasta la posición 7 (más corta), estos son los correspondientes valores de las diferentes cotas de nuestro sistema.

posiciones brazo	x1 (m)	x2 (m)	L1(m)	L2 (m)
1	0,669	0,105	1,125	0,187
2	0,6275	0,105	1,05	0,187
3	0,583	0,105	0,97	0,187
4	0,54	0,105	0,89	0,187
5	0,495	0,105	0,81	0,187
6	0,448	0,105	0,725	0,187
7	0,407	0,105	0,65	0,187

Tabla 19: Valores en metros de las correspondientes cotas del brazo de la bomba.

En la imagen siguiente podemos observar visualmente las diferentes posiciones del brazo.

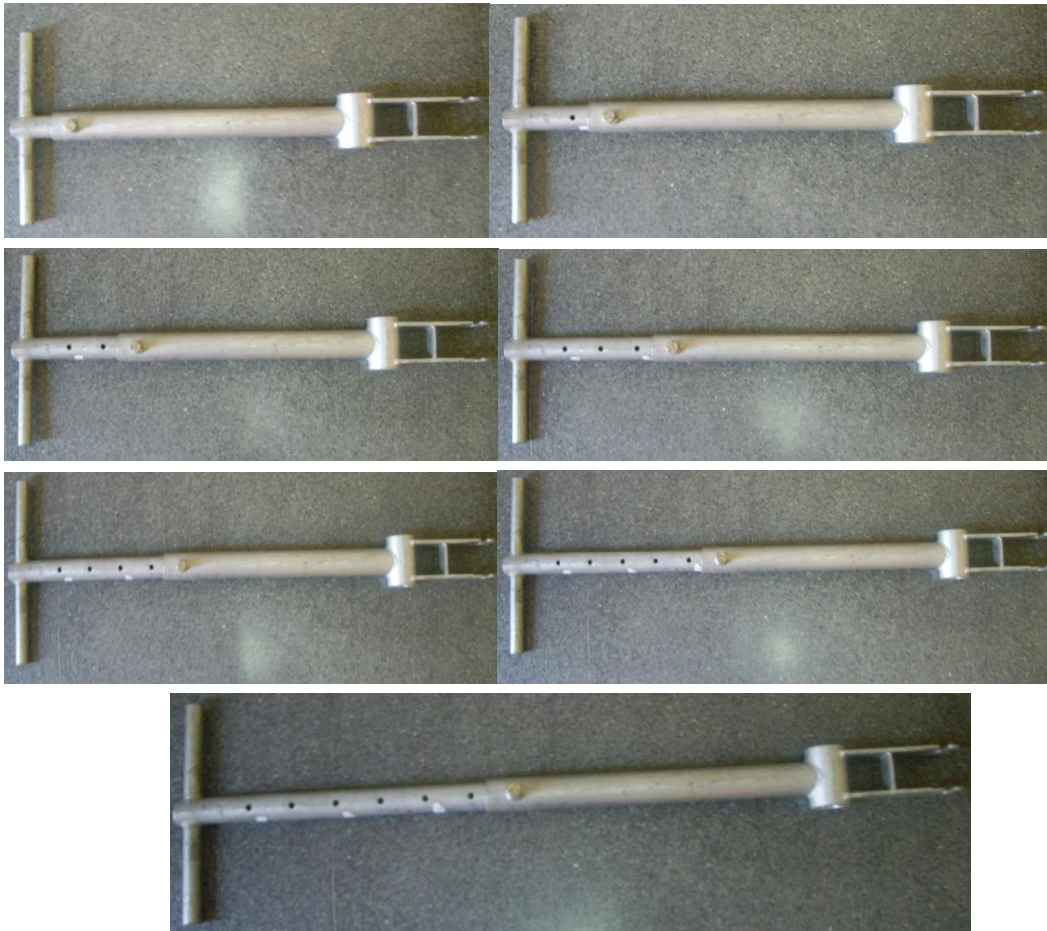


Figura 66: Distintas posiciones del brazo.

Seguimos con el cálculo de las fuerzas “P1” y “P2”, que corresponden al peso de las dos partes del brazo, así como las correspondientes cotas donde se aplican las citadas fuerzas.

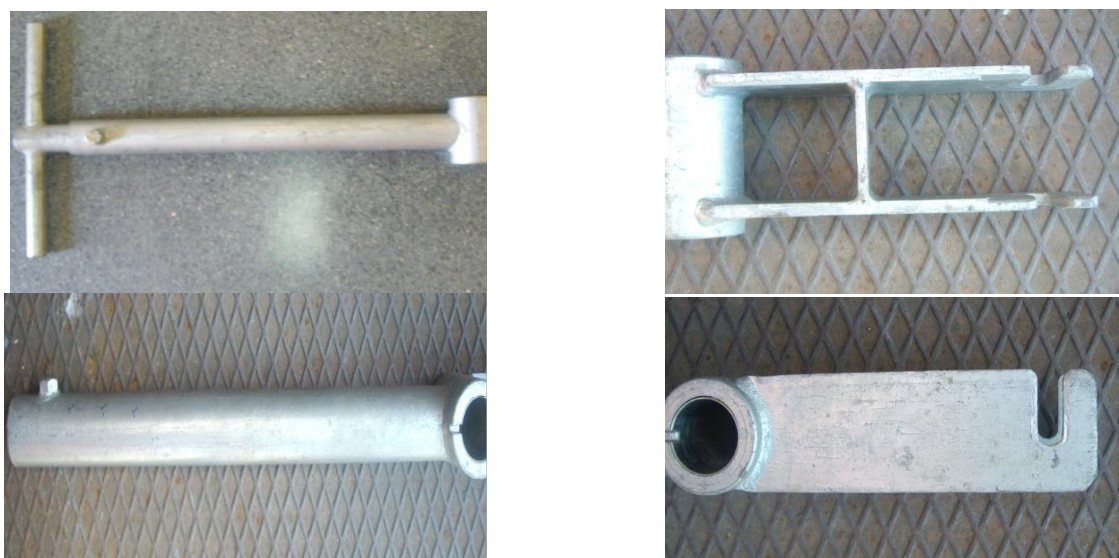


Figura 67: Distribución de masas de las dos partes del brazo.

Comenzaremos por la parte 1.

- **P1:** debido a las diferentes opciones de posición del extremo libre del brazo de la bomba, su punto de aplicación variará, aunque “P1” permanecerá constante. Comenzaremos por el cálculo de “P1”, y seguiremos con los distintos valores de “X1” en función de la posición en la que nos encontremos.

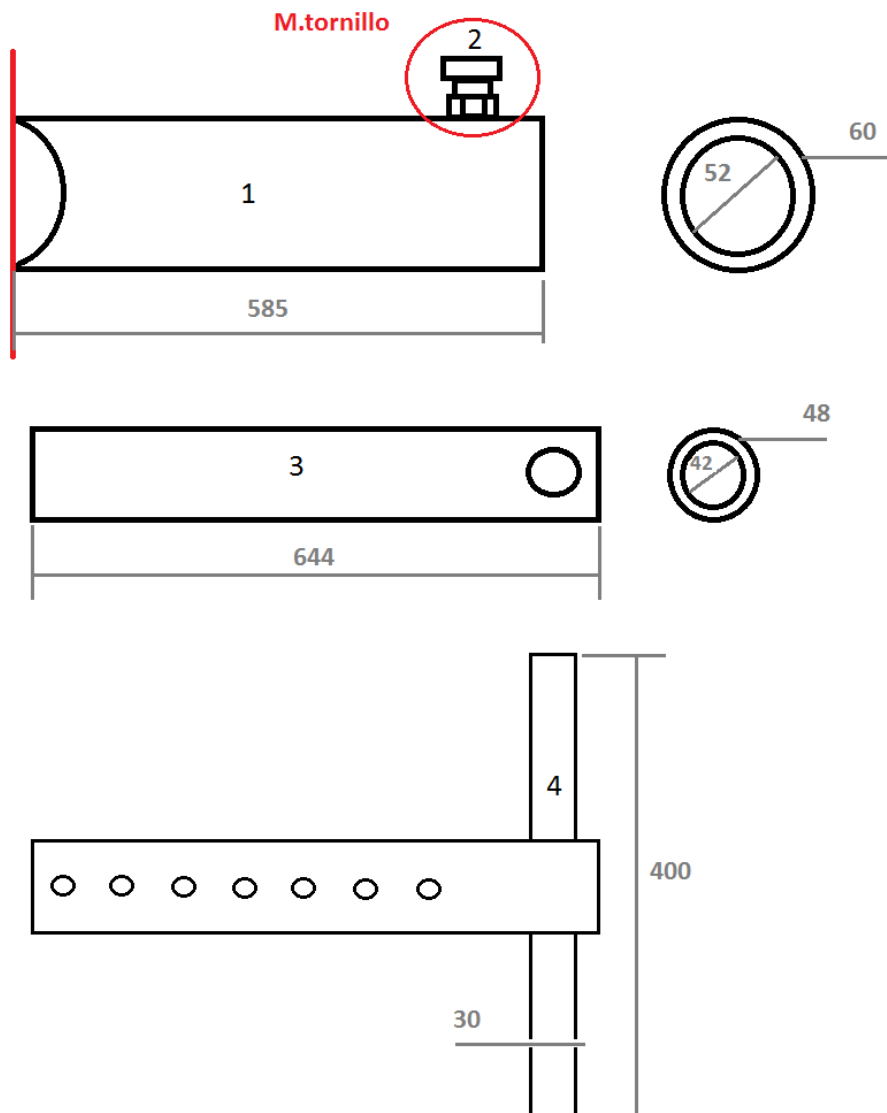


Figura 68: Dimensiones del tramo de brazo libre, cotas en mm.

Como podemos observar diferenciamos cuatro volúmenes diferentes, con lo que P1 será:

$$P1 = (V1 + V2 + V3 + V4) \cdot \rho_{ACERO} \cdot g$$

$$\rho_{acero} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

En función de las cuatro masas:

$$P1 = (M1 + M2 + M3 + M4) \cdot g$$

Donde “M2”, corresponde a la masa del tornillo y su hembra roscada, capaces de fijar la posición elegida del brazo.

$$M2 = 0,055 \text{ Kg}$$

Además:

$$M1 = \left(\frac{\pi \cdot 0,06^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,052^2}{4} \right) \cdot 0,585 \cdot 7850 = 3,23 \text{ Kg}$$

$$M3 = \left(\frac{\pi \cdot 0,048^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,042^2}{4} \right) \cdot 0,644 \cdot 7850 = 2,088 \text{ Kg}$$

$$M4 = \left(\frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \right) \cdot 0,4 \cdot 7850 = 2,22 \text{ Kg}$$

Con lo que:

$$P1 = 74,41 \text{ N}$$

Conocido el valor del peso del tramo libre del brazo, seguiremos con el cálculo de la distancia del punto de aplicación del citado esfuerzo al apoyo del brazo (la cota de su centro de gravedad). Como veremos a continuación esta cota varía en función de la posición del brazo, por lo que para cada posición tendremos un punto de aplicación de “P1” distinto de los otros. Además para hacernos una idea del correcto valor de “X1” cuanto más alargemos el tramo libre del brazo, el punto de aplicación de su peso estará más alejado del apoyo.

Antes de comenzar identificaremos los puntos característicos que aparecerán en los esquemas siguientes:

- M1: cota horizontal donde se aplica el peso de la parte 1 antes nombrada, permanecerá constante en todo el cálculo posterior.
- M2: distancia horizontal donde se aplica el peso del tornillo que fija la posición del brazo, la cual permanecerá constante.
- M3: cota horizontal de aplicación del peso de la parte 3, que varía con la posición del brazo.
- M4: distancia horizontal donde se aplica el peso de la parte 4 del brazo, la cual varía en función de la posición.

Ayudándonos de la ecuación del cálculo de masas, conseguimos la cota del punto donde se aplica “P1”.

$$X1 = \frac{\sum_i M_i x_{iG}}{\sum_i M_i}$$

Para los centros de gravedad de las diferentes masas, sabemos que en el caso de “M1” y “M3” al ser un rectángulo y tener una distribución constante de masa estará aplicada en el punto medio de dicho rectángulo, en cuanto a “M2” sabemos la cota inicialmente, y para “M4” la colocaremos en el centro del cilindro.

A continuación veremos las diferentes situaciones según la posición en la que nos encontremos y los puntos donde se aplican las cuatro masas de tramo del brazo.

✓ **Posición 1:**

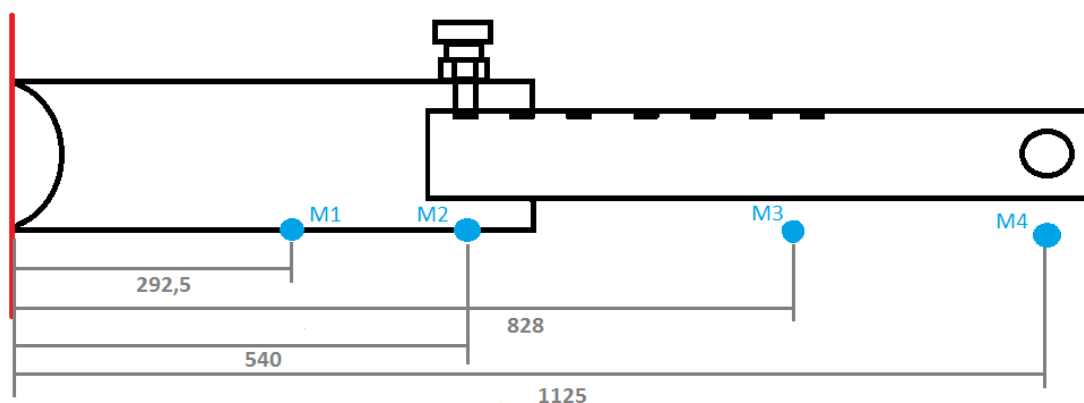


Figura 69: Posición 1 del brazo libre, cotas en mm.

Con todas las dimensiones de la imagen anterior, podremos calcular la cota del punto de aplicación de la fuerza “P1”, gracias a la siguiente ecuación.

$$X1 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = 0,669m$$

✓ **Posición 2:**

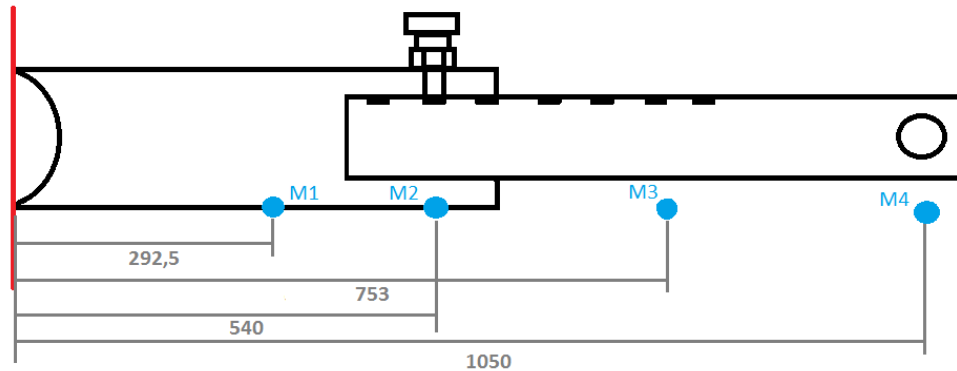


Figura 70: Posición 2 del brazo libre, cotas en mm.

Con las cotas de los diferentes puntos donde actúan las fuerzas nombradas anteriormente, calculamos el punto donde se aplica la fuerza “P1”:

$$X1 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = 0,6275m$$

✓ **Posición 3:**

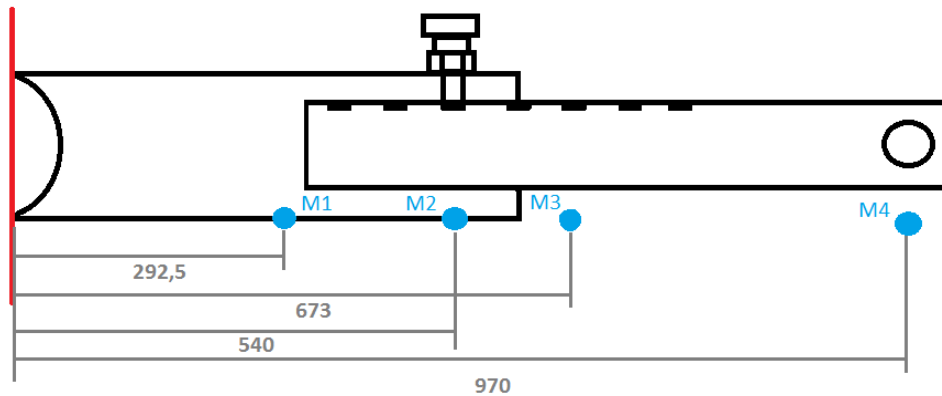


Figura 71: Posición 3 del brazo libre, cotas en mm.

La correspondiente distancia del apoyo al punto de aplicación de “P1” en la posición 3 es:

$$X1 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = 0,583 \text{ m}$$

✓ **Posición 4:**

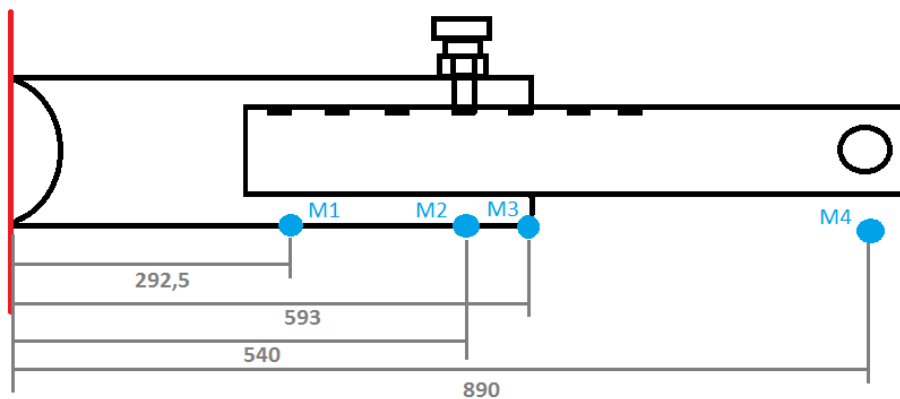


Figura 72: Posición 4 del brazo libre, cotas en mm.

Y su punto de aplicación tendrá una cota:

$$X1 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = 0,54 \text{ m}$$

✓ **Posición 5:**

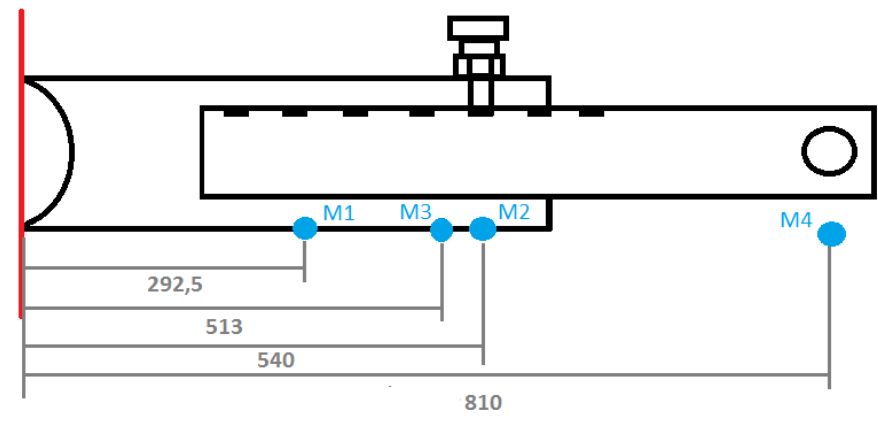


Figura 73: Posición 5 del brazo, cotas en mm.

Siguiendo con la cota "X1":

$$X1 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = 0,495 \text{ m}$$

✓ **Posición 6:**

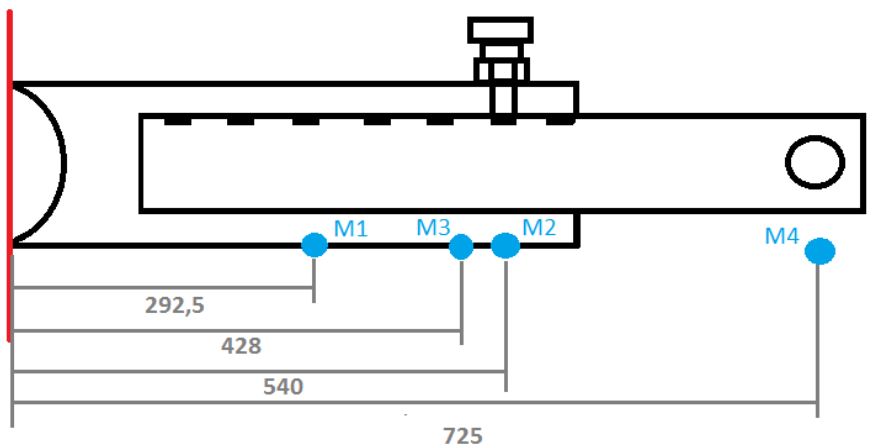


Figura 74: Posición 6 del brazo, cotas en mm.

Con lo que:

$$X1 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = 0,448 \text{ m}$$

✓ **POSICION 7:**

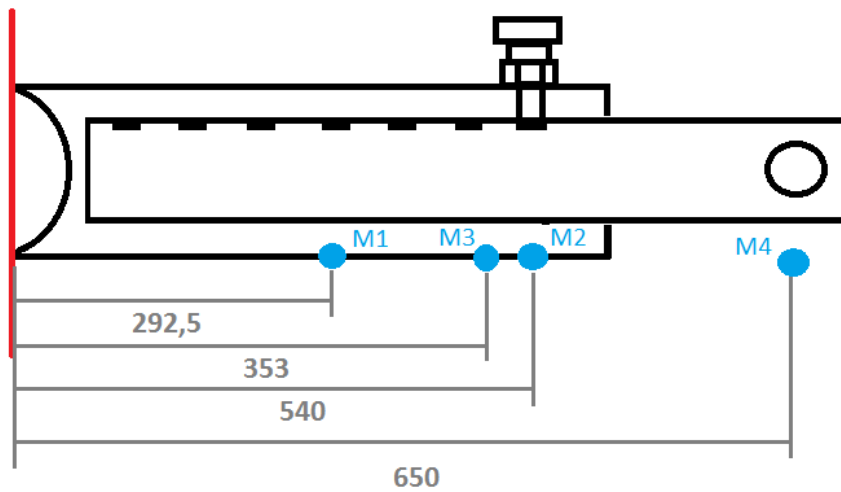


Figura 75: Posición 7 del brazo, cotas en mm.

Y su punto de actuación tendrá la siguiente distancia hasta el apoyo:

$$X1 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = 0,407 \text{ m}$$

- **P2:** el tramo anclado del brazo tiene unas dimensiones características, por lo que para poder calcularnos su peso debemos utilizar la siguiente ecuación.

$$P2 = (2 \cdot V1 + V3 - 2 \cdot V2) \cdot \rho_{ACERO} \cdot g$$

Donde se deduce que “V1”, “V2” y “V3” son los diferentes volúmenes de cada parte de masa del tramo de brazo anclado, y la densidad del acero galvanizado es:

$$\rho_{ACERO} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Con lo que utilizando las siguientes dimensiones podremos calcularnos P2.

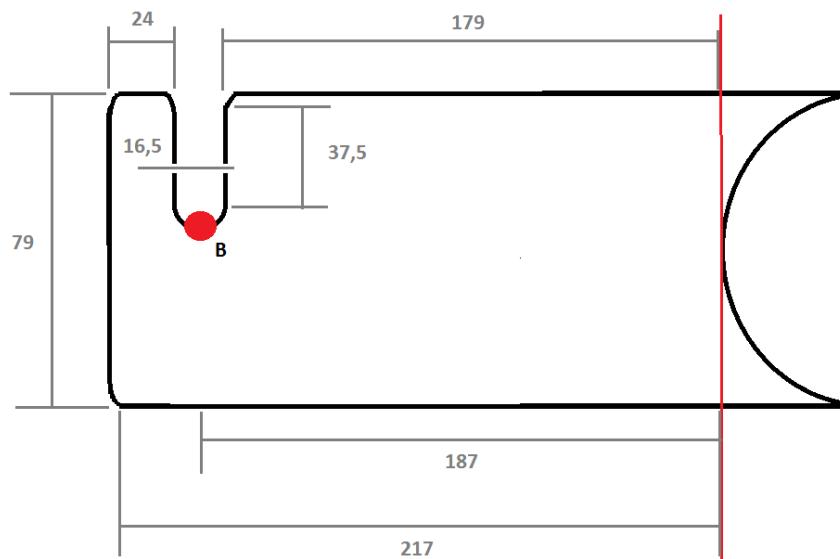


Figura 76: Perfil del tramo anclado del brazo, cotas en mm.

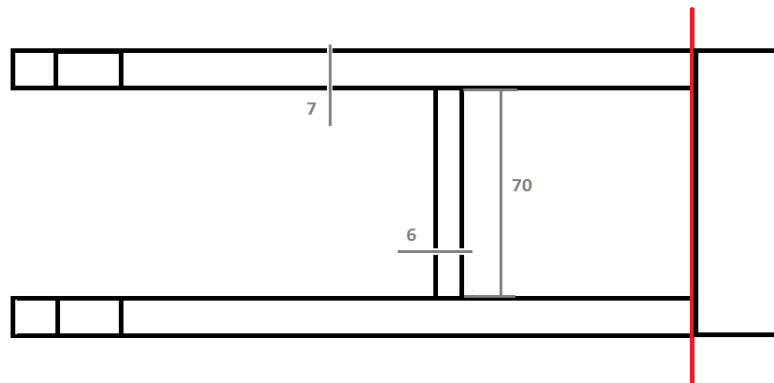


Figura 77: Alzado del tramo anclado del brazo, cotas en mm.

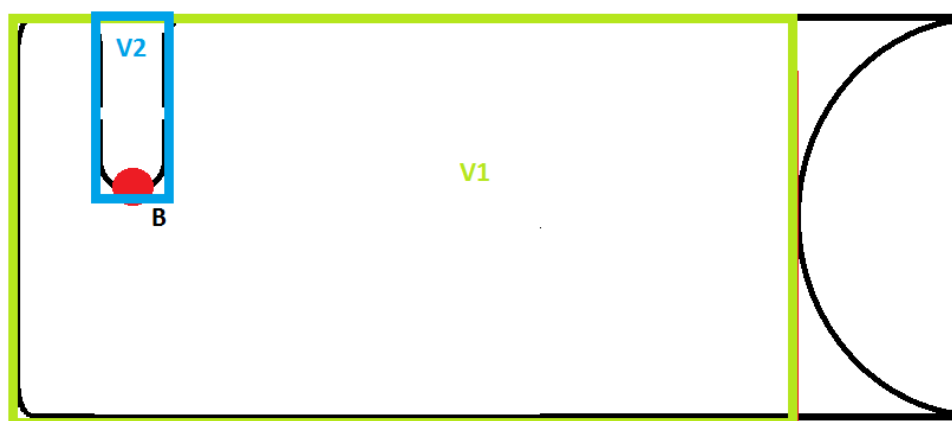


Figura 78: Volúmenes aplicados en el cálculo del peso del tramo anclado.

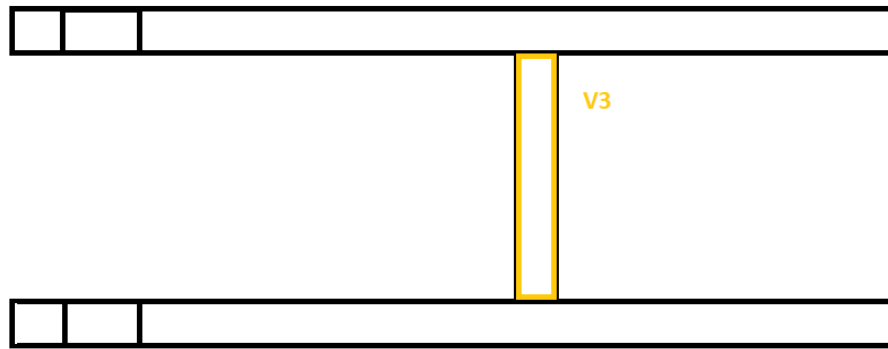


Figura 79: Volumen 3 del tramo de brazo anclado.

Con lo que:

$$\begin{aligned}
 P2 &= (2 \cdot V1 + V3 - 2 \cdot V2) \cdot \rho_{ACERO} \cdot g \\
 &= \left[2 \cdot (0,217 \cdot 0,075 \cdot 0,007) + (0,006 \cdot 0,055 \cdot 0,07) - 2 \right. \\
 &\quad \left. \cdot \left(0,016 \cdot 0,0375 + \frac{\pi \cdot 0,016^2}{8} \right) \cdot 0,007 \right] \cdot 7850 \cdot g = 18,55 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Lo siguiente será calcular la cota “X2” en la que se aplica la fuerza antes calculada, para ello utilizaremos el teorema del cálculo de masas.

$$X2 = \frac{\sum_i M_i \cdot x_{iG}}{\sum_i M_i} = \frac{\rho \cdot (2 \cdot V1 \cdot 0,1085 + V2 \cdot 0,075 - 2 \cdot V3 \cdot 0,187)}{\rho \cdot (2 \cdot V1 + V2 - 2 \cdot V3)}$$

$$X2 = 0,111 \text{ m}$$

En la siguiente tabla veremos un resumen de los correspondientes valores de cada una de las fuerzas aplicadas en el brazo para una altura dada, con la cota de su posición de aplicación en las diferentes posiciones del brazo.

H[m]	P.eje[Kg]	P.agua[Kg]	P.tuberia [Kg]	P.tuberia[N]	P1[N]	P2[N]
10	9	19,63	28,63	280,574	74,41	8,428
15	13,5	29,45	42,95	420,91	74,41	8,428
20	18	39,27	57,27	561,246	74,41	8,428
25	22,5	49,1	71,6	701,68	74,41	8,428
30	27	58,9	85,9	841,82	74,41	8,428
35	31,5	68,72	100,22	982,156	74,41	8,428
40	36	78,54	114,54	1122,492	74,41	8,428

Tabla 20: Valores de las fuerzas actuantes en la acción de bombeo en función de la altura elegida.

posiciones	x1 (m)	x2 (m)	L1(m)	L2 (m)
1	0,669	0,105	1,125	0,187
2	0,6275	0,105	1,05	0,187
3	0,583	0,105	0,97	0,187
4	0,54	0,105	0,89	0,187
5	0,495	0,105	0,81	0,187
6	0,448	0,105	0,725	0,187
7	0,407	0,105	0,65	0,187

Tabla 21: Disposiciones geométricas según la posición dada.

5.3.2 Fuerzas de bombeo

Con todos estos datos representados en las tablas anteriores es el momento de poder calcular la fuerza que debe realizar el usuario de la bomba. Distinguimos entre la fuerza de subida y de bajada del brazo, de las que a priori podemos deducir cual es la fuerza más crítica de entre las dos, en este caso conlleva mayor dificultad la fuerza de subida, ya que en el peor de los casos si tenemos una elevada fuerza de bajada necesaria para el bombeo, el usuario podría ayudarse de su peso para facilitar la bajada, pero en el caso de la subida del brazo sería una acción más crítica, ya que está demostrado que el esfuerzo máximo de elevación con los brazos es menor que el de bajada.

Para el cálculo de las citadas fuerzas sabemos que para el equilibrio del brazo el sumatorio de momentos en el apoyo será igual a cero.

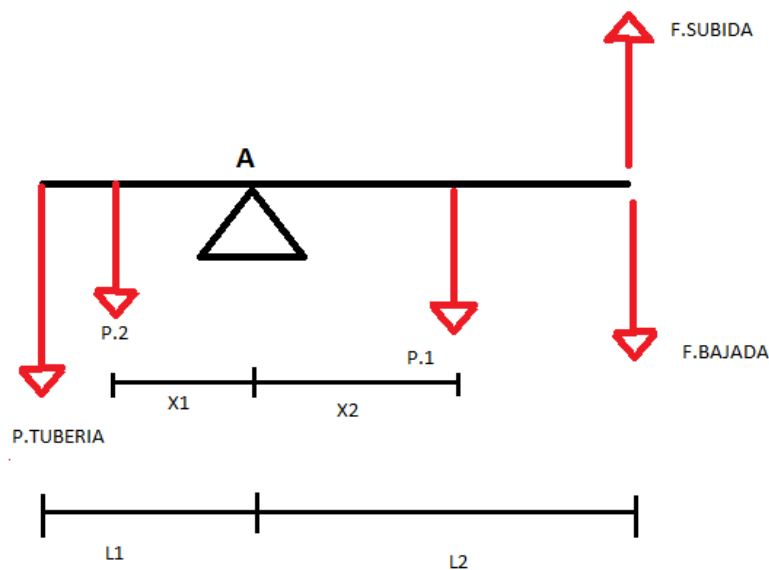


Figura 80: Esquema de las fuerzas aplicadas en el brazo de la bomba.

En el caso de ser el movimiento de **subida** del brazo, el esfuerzo correspondiente será:

$$\sum_i M_A = 0 = F_{tuberia} \cdot L_2 + P_2 \cdot X_2 + F_{subida} \cdot L_1 - P_1 \cdot X_1 = 0$$

Despejando la fuerza de subida:

$$F_{subida} = \frac{P_1 \cdot X_1 - F_{tuberia} \cdot L_2 - P_2 \cdot X_2}{L_1}$$

Debemos saber que para el cálculo de la fuerza de subida del brazo, el peso de la tubería correspondería al peso del eje sin considerar el peso del agua, ya que en el movimiento vertical y de sentido negativo del pistón el agua que se encuentra entre ambos pistones pasa a estar encima del pistón móvil, gracias a que este movimiento iguala las presiones del agua de debajo del pistón con la de encima de éste, por lo que el peso del agua no nos supondrá ninguna fuerza.

Para el movimiento de **bajada** del brazo realizaremos la misma operación, pero teniendo en cuenta el signo de la fuerza de bajada, por lo que.

$$\sum_i M_A = 0 = P_1 \cdot X_1 + F_{bajada} \cdot L_1 - F_{tuberia} \cdot L_2 - P_2 \cdot X_2 = 0$$

$$F_{bajada} = \frac{F_{tuberia} \cdot L_2 + P_2 \cdot X_2 - P_1 \cdot X_1}{L_1}$$

A continuación observaremos los resultados del cálculo de las dos fuerzas de bombeo para diferentes alturas y en todas las posiciones del brazo.

- 10 metros:

Posición	F.bajada(N)	F.subida(N)
1	4,218753778	27,75808
2	7,46106	26,7998333
3	11,49005979	25,5964742
4	16,11796404	24,302191
5	21,84375062	22,5685185
6	29,22856276	20,3906621
7	37,29464308	18,0498769

Tabla 22: Valores de la fuerza de subida y bajada en función de la posición para 10 metros de profundidad.

- 15 metros:

Posición	F.bajada(N)	F.subida(N)
1	27,54571556	20,42768
2	32,45423333	18,9458333
3	38,54452577	17,0947216
4	45,60429213	15,036236
5	54,24230864	12,3874074
6	65,42557241	9,01590345
7	77,66823077	5,36264615

Tabla 23: Valores de la fuerza de subida y bajada en función de la posición para 15 metros de profundidad.

- 20 metros:

Posición	F.bajada(N)	F.subida(N)
1	50,8726773	13,09728
2	57,4474067	11,0918333
3	65,5989918	8,59296907
4	75,0906202	5,7702809
5	86,6408667	2,2062963
6	101,622582	-2,35885517
7	118,041818	-7,32458462

Tabla 24: Valores de la fuerza de subida y bajada en función de la posición para 20 metros de profundidad.

- 25 metros:

Posición	F.bajada(N)	F.subida(N)
1	74,21592889	5,76688
2	82,45803333	3,23783333
3	92,67235052	0,09121649
4	104,5975393	-3,49567416
5	119,0620494	-7,97481481
6	137,844869	-13,7336138
7	158,4436	-20,0118154

Tabla 25: Valores de la fuerza de subida y bajada en función de la posición para 25 metros de profundidad.

- 30 metros:

Posición	F.bajada(N)	F.subida(N)
1	97,51031111	-1,56352
2	107,4163	-4,61616667
3	119,6890309	-8,41053608
4	134,0426854	-12,7616292
5	151,415358	-18,1559259
6	173,9913241	-25,1083724
7	198,7608	-32,6990462

Tabla 26: Valores de la fuerza de subida y bajada en función de la posición para 30 metros de profundidad.

- 35 metros:

Posición	F.bajada(N)	F.subida(N)
1	120,837273	-8,89392
2	132,409473	-12,4701667
3	146,743497	-16,9122887
4	163,529013	-22,0275843
5	183,813916	-28,337037
6	210,188334	-36,483131
7	239,134388	-45,3862769

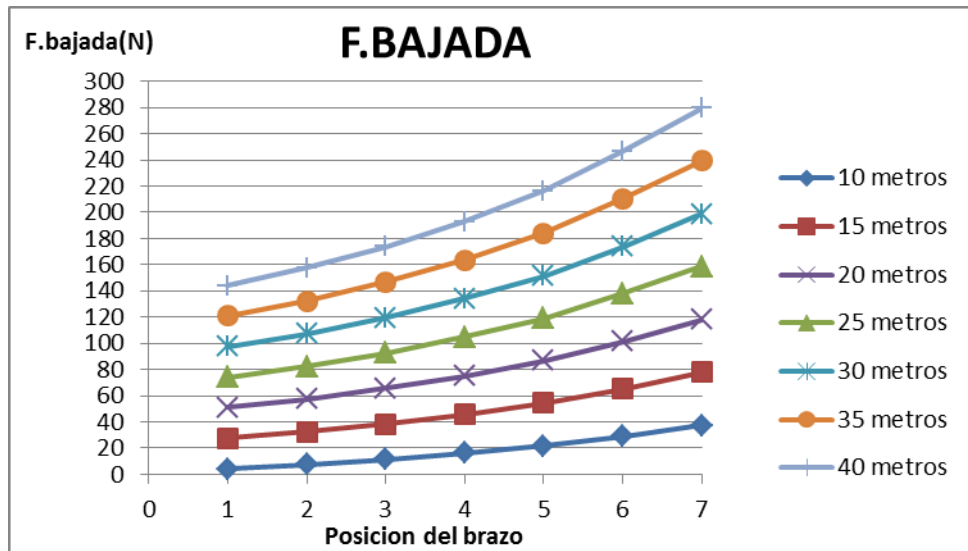
Tabla 27: Valores de la fuerza de subida y bajada en función de la posición para 35 metros de profundidad.

- 40 metros:

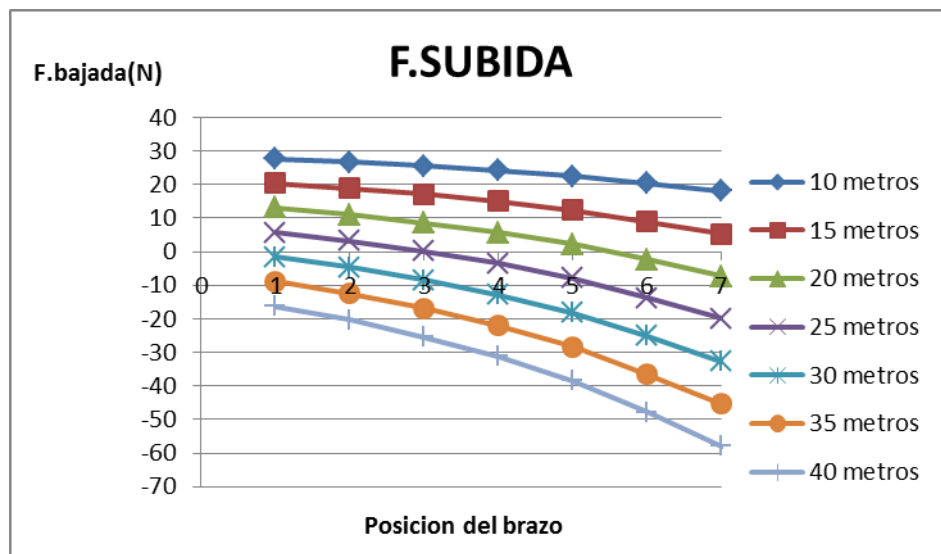
Posición	F.bajada(N)	F.subida(N)
1	144,1642347	-16,22432
2	157,4026467	-20,3241667
3	173,7979629	-25,4140412
4	193,0153416	-31,2935393
5	216,2124741	-38,5181481
6	246,3853434	-47,8578897
7	279,5079754	-58,0735077

Tabla 28: Valores de la fuerza de subida y bajada en función de la posición para 40 metros de profundidad.

A continuación representaremos todos estos resultados en unas gráficas para poder sacar unas conclusiones sobre el comportamiento de nuestra instalación.



Grafica 5: Fuerza de bajada del usuario a una altura determinada en función de la posición del brazo.



Grafica 6: Fuerza de subida del usuario a una altura dada en función de la posición del brazo.

Observando ambas graficas podemos sacar unas primeras conclusiones, que esperamos que se aproximen bastante nuestro estudio final.

A priori podemos establecer que a medida que aumenta la altura de bombeo, la fuerza de subida disminuye, por la ayuda del peso del eje de acero, hasta valores negativos de la fuerza necesaria de bombeo, lo que indica que el movimiento de subida lo realiza la propia bomba. Pero esa disminución se ve contrariada por el aumento de la fuerza de bajada a niveles de unos 28 kg en el caso de 40 metros de profundidad, por lo que un niño de unos 30 kg de peso podría desempeñar la función de bombeo, simplemente ayudándose de su peso en la fuerza de bajada.

En función de las posiciones del brazo, se establece que la fuerza de subida es menor en distancias cortas y mayor en posiciones alejadas del apoyo, al contrario ocurre en la fuerza de bajada.

Estas primeras conclusiones nos servirán de base para el estudio final del proyecto.

6. Estudio final

6.1 Fuerzas de bombeo

En este apartado realizaremos un estudio final de las fuerzas de bombeo, en el cual se contrastaran valores reales obtenidos en el ensayo, con los valores ideales, que representamos en apartados anteriores. En el ensayo pondremos en práctica todos los estudios anteriores de simulación, para acercarnos a una situación real de bombeo.

El ensayo será enfocado en dos opciones de bombeo, la primera contara con una profundidad de 3,5 metros, sin simulación de altura, y en la segunda tomaremos una altura de 12 metros, con su correspondiente simulación. La manera de medir las correspondientes fuerzas de bombeo, se basara en un sistema de pesos situados en el extremo libre del brazo.

Teniendo en cuenta el sistema de fuerzas que actúa en el brazo de la bomba, nos despejaremos las correspondientes fuerzas de subida y bajada, de la misma manera que en el apartado anterior.

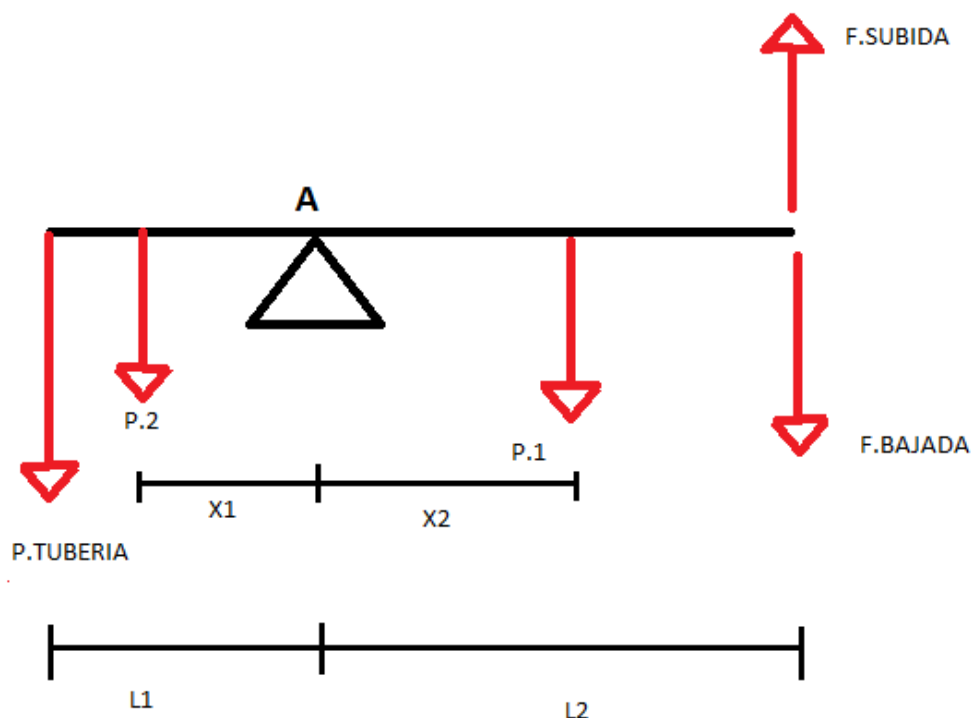


Figura 81: Esquema de las fuerzas actuantes en el brazo de la bomba.

$$F_{subida} = \frac{P_1 \cdot X_1 - F_{tuberia} \cdot L_2 - P_2 \cdot X_2}{L_1}$$

$$F_{bajada} = \frac{F_{tuberia} \cdot L_2 + P_2 \cdot X_2 - P_1 \cdot X_1}{L_1}$$

Además tenemos:

posiciones	x1 (m)	x2 (m)	L1(m)	L2 (m)
1	0,669	0,105	1,125	0,187
2	0,6275	0,105	1,05	0,187
3	0,583	0,105	0,97	0,187
4	0,54	0,105	0,89	0,187
5	0,495	0,105	0,81	0,187
6	0,448	0,105	0,725	0,187
7	0,407	0,105	0,65	0,187

Tabla 29: Datos geométricos del brazo según la posición de éste.

$$P_1 = 74,41 \text{ N}$$

$$P_2 = 18,55 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta que para la fuerza de subida del brazo en la fuerza de la tubería solo influye el peso del eje, y que para la fuerza de subida actúa además del peso del eje, el peso de la columna de agua, tendremos para los dos ensayos:

3,5 metros:

$$P_{eje} = 33,12 \text{ N}$$

$$P_{agua} = 67,34 \text{ N}$$

12 metros:

$$P_{eje} = 107,8 \text{ N}$$

$$P_{agua} = 230,9 \text{ N}$$

Además para la simulación de los 12 metros de profundidad, debemos presurizar el agua a una presión de:

$$P = P_a + \rho \cdot g \cdot h = 2,085$$

Por la situación del sensor tenemos:

$$P = 2,085 - 0,2352 = 1,8498 \text{ bar}$$

Y según las rectas de calibración la presión que debemos tomar será:

$$P = 1,82 \text{ bar}$$

Calculada la presión a la que debemos presurizar el agua, lo único que nos quedaría sería simular el peso del eje de bombeo. En la siguiente tabla veremos el peso que debemos colocar en el extremo libre del brazo para la simulación del eje.

Posición	P.simulado(N)
1	17,9187556
2	19,1986667
3	20,7820619
4	22,6501124
5	24,8871605
6	27,8049655
7	31,0132308

Tabla 30: Valores del peso aplicado en el extremo del brazo, que simule el peso del eje.

Con lo que en las siguientes tablas podemos ver los resultados de las fuerzas teóricas de bombeo, seguidas de las fuerzas reales, calculadas en el ensayo.

3,5 metros

Posición	F.subida	F.bajada	F.subida real	F.bajada real
1	37,0125333	-25,8191289	53,557	-14,21
2	36,715319	-24,7223857	51,94	-13,867
3	36,329732	-23,3476907	50,47	-13,23
4	36,000236	-21,8512697	47,53	-12,446
5	35,4219259	-19,8755309	45,864	-10,143
6	34,7510207	-17,3819448	44,296	-7,35
7	34,0672	-14,694	46,55	-4,9

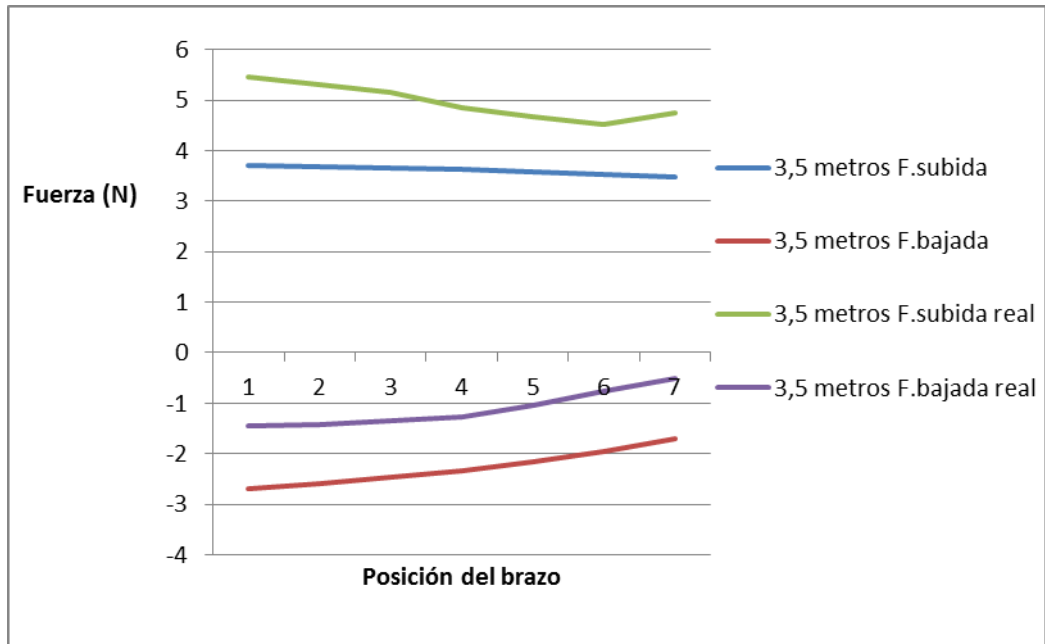
Tabla 31: Valores de las fuerzas teóricas y reales de bombeo en Newton.

12 metros

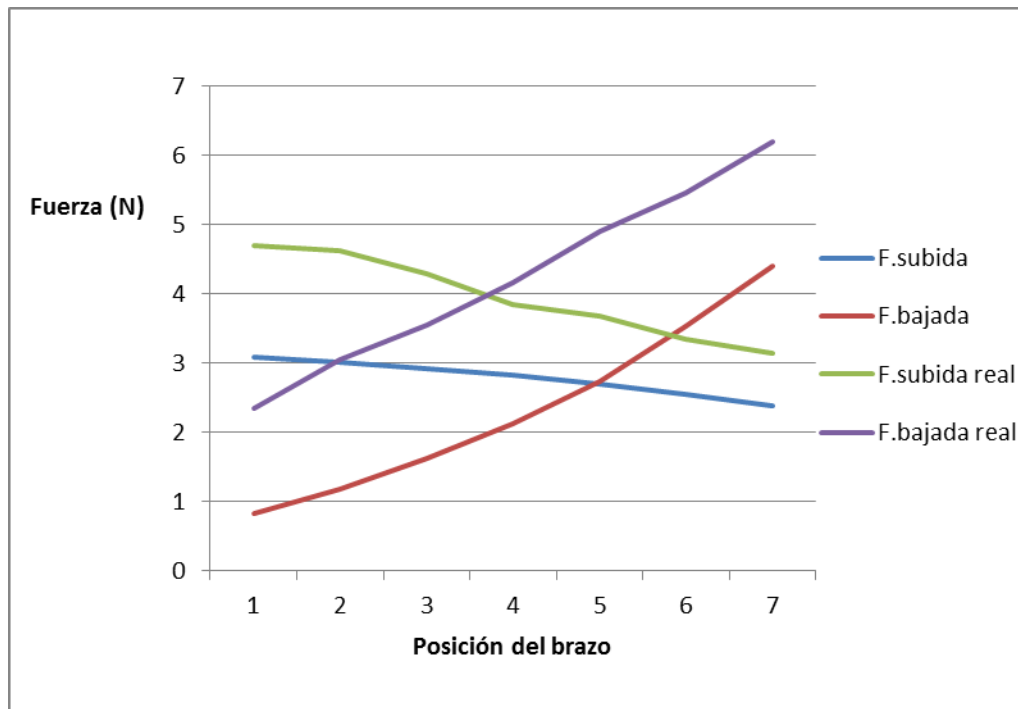
Posición	F.subida	F.bajada	F.subida real	F.bajada real
1	24,59905778	13,7816533	46,06	23,03
2	23,41516667	17,7070238	45,374	29,89
3	21,93265979	22,5810515	41,993	34,79
4	20,30904494	28,2058989	37,73	40,67
5	18,18098765	35,1255556	36,064	48,02
6	15,48873103	44,0675448	32,83	53,41
7	12,58233846	53,8458154	30,87	60,76

Tabla 32: Valores de las fuerzas teóricas y reales de bombeo en Newton.

Para poder observar mejor estos valores, los representaremos en las siguientes gráficas, para poder sacar unas conclusiones finales.



Gráfica 7: Representación de las fuerzas de bombeo, para 3,5 metros de altura.



Gráfica 8: Representación de las fuerzas de bombeo, para 12 metros de altura.

De las gráficas anteriores, las cuales representan las fuerzas reales de bombeo, además de las fuerzas teóricas, podemos comentar, que tanto para la fuerza de subida como la fuerza de bajada, sin importarnos la altura de bombeo, la fuerza real que tiene que hacer el usuario es siempre mayor. Esta diferencia parece prácticamente constante, entre un rango de 5 a 20 Newton de fuerza, que podemos considerar que no es un sobresfuerzo elevado para el usuario.

Viendo que la diferencia entre la fuerza real y la calculada teóricamente permanece constante dentro de un rango concreto, podemos decir que se debe al correspondiente rozamiento de ciertas partes de la bomba durante la acción de bombeo. Como puede ser el rozamiento del eje de bombeo con el collarín, el desarrollado por el rozamiento del pistón móvil con la tubería de bombeo o el correspondiente rozamiento en las piezas de anclaje del brazo con el cuerpo de la bomba.

Por lo que podemos asegurar que la simulación de nuestra instalación se asemeja a cualquier instalación a pie de campo.

6.2 Caudal de bombeo

En este apartado analizaremos el caudal de agua que podemos bombear a diferentes alturas, en el rango que nos permita el sensor de presión (0-15 metros), simulando las alturas elegidas, mediante los procesos explicados en apartados anteriores.

Elegimos tres alturas diferentes para nuestro estudio, cinco, diez y quince metros, en una única posición del brazo de la bomba, presurizando el fluido a su correspondiente presión de simulación y el esfuerzo que simule el peso del eje de bombeo de la altura elegida, además de realizar la acción de bombeo con una frecuencia de 1 Hz por pulso (entendiendo pulso por el movimiento de subida o de bajada, pero solo uno).

5 metros

Posición 1.

$$P = 1,2 \text{ bar}$$

$$P_{eje} = 0,17 \text{ kg}$$

$$\longrightarrow Q_{bombeo} = 0,015 \text{ m}^3/\text{min} = 15 \text{ litros/min}$$

10 metros

Posición 1.

$$P = 1,6 \text{ bar}$$

$$P_{eje} = 0,934 \text{ kg}$$

$$\longrightarrow Q_{bombeo} = 0,013 \text{ m}^3/\text{min} = 13 \text{ litros/min}$$

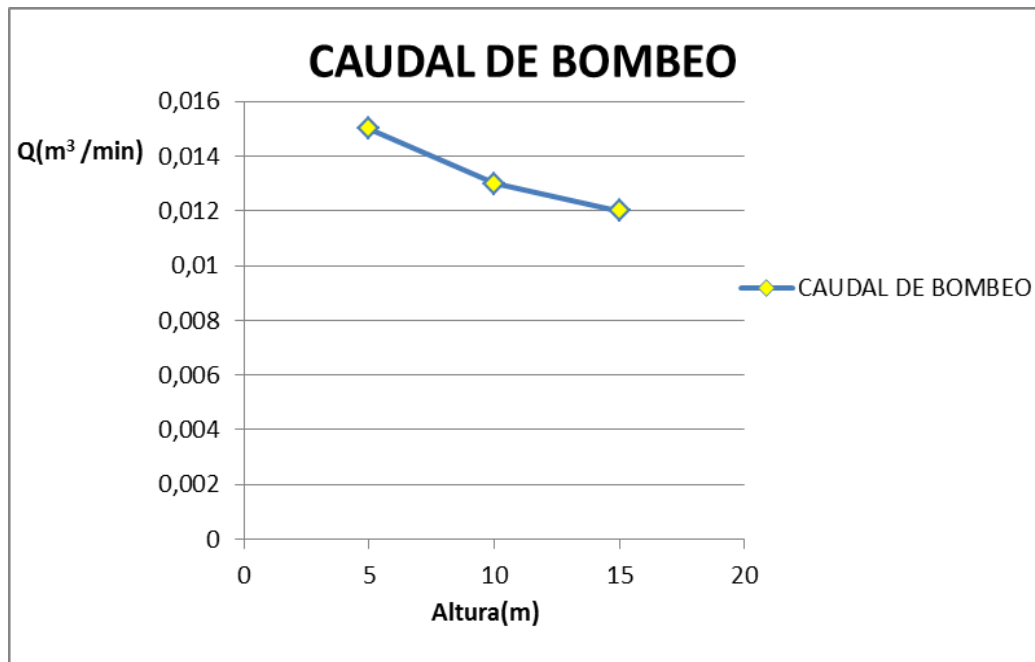
15 metros

Posición 1.

$$P = 2,14 \text{ bar}$$

$$P_{eje} = 1,64 \text{ kg}$$

$$\longrightarrow Q_{bombeo} = 0,012 \text{ m}^3/\text{min} = 12 \text{ litros/min}$$



Grafica 9: Caudal de bombeo.

Aunque solo tengamos tres puntos de estudio del caudal, podemos ver que el desarrollo del caudal de bombeo sigue una tendencia exponencial hacia abajo. Por lo que sabemos de estudios anteriores se encamina perfectamente al desarrollo del caudal teórico, ya que por motivo del aumento de altura, el citado caudal ira disminuyendo hasta llegar a valores muy parejos, casi constantes. Por lo que podemos establecer el correcto funcionamiento de nuestro sistema de simulación, así como la instalación al completo.

Además los valores del caudal de bombeo están entre los rangos establecidos para un correcto desarrollo de sus usuarios, según las especificaciones de la bomba.

7. Conclusiones

Aunque en cada apartado hemos ido comentando unas breves conclusiones, llegados al final del proyecto será interesante comentar unas conclusiones finales.

Como hemos podido observar en los diferentes ensayos de la simulación del proyecto, los valores calculados en nuestra instalación de laboratorio son muy parejos a los valores ideales, que nos tendrían que salir, por lo que en este caso consideramos una simulación correcta de la bomba.

En cuanto a resultados de funcionamiento, nuestra instalación se asemeja mucho a una instalación a pie de campo, las fuerzas y los caudales de bombeo están establecidos dentro de los rangos de seguridad, por lo que el trabajo realizado sobre la bomba a dado unos resultados positivos.

Con todos los valores comprendidos entre unos rangos correctos, lo único que podemos decir para operaciones futuras con la instalación, es que se mejore la estanquidad del sistema de presión, probablemente del sistema de sellado, formado por el collarín, el cual en la interacción con el eje de bombeo produce unas pérdidas de presión, que aunque para rangos de altura de hasta 15 metros se pueden considerar despreciables, en estudios futuros a mayores alturas de simulación podrían desencadenar en errores notables.

8. Bibliografía

www.monografias.com

www.ecojoven.com/tres/10/acuiferos.html

www.solociencia.com/.../problematica-global-agua-problema-

www.portal.unesco.org

www.nautica.twenga.es/bomba-manual.html

www.actiweb.es/e-sata/bomba_manual_de_agua.html

www.unesco.org/new/es/unesco/

www.eco.microsiervos.com/agua/distribucion-agua-planeta.html

PFC.Jaime Arroyo Fernández

PFC.Unai Tomillo Gutiérrez